立体映像におけるズーム時のコンバージェンスポイント調整に関する研究

Study on adjustment of convergence point for zooming technique in stereoscopic video

2013 年 12 月

河　宗秀

Jongsoo　HA

目　次

序　論 1

1　研究主旨 1

2　研究背景 2

2.1　立体映像の時代 2

2.2　立体映像撮影機材 3

2.3　立体映像の重要な要素 6

2.4　立体映像が引き起こす問題 15

2.5　先行研究調査 18

3　研究目的 20

4　研究方法 21

5　立体映像研究における本研究の位置づけと論文の構成 22

第 1 章　立体映像におけるズーム表現 25

1　問題提起 25

1.1　立体映像撮影の問題 25

1.2　専門家の立体映像撮影 25

1.3　一般ユーザーの立体映像撮影 28

2　仮説の設定 28

3　3DCG による予備実験 29

3.1　実験環境 30

3.2　実験方法 31

3.3　実験結果 33

4　まとめ 38

第 2 章　ズーム時のコンバージェンスポイント調整 40

1　フォーカスとコンバージェンスポイントの関係モデル 40

1.1　フォーカス 40
1.2　ズームイン前後のコンバージェンスポイント 42
1.3　ズームイン前のフォーカスとコンバージェンスポイントの関係モデル 43
2　コンバージェンスポイント調整技法 47
2.1　固定コンバージェンスポイント技法(Fixed Convergence Point Method (FCP 技法)) 47
2.2　フォーカスコンバージェンスポイント一致技法(Focus-Convergence Corresponding Method (FCC 技法)) 48
2.3　フォーカスコンバージェンスポイント連動技法 (Coupled Focus-Convergence Method (CFC 技法)) 48
2.4　快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法(Convergence Comfort Threshold Method (CCT 技法)) 49
3　まとめ 51
第 3 章　実写撮影映像による性能評価 53
1　実写による提案技法の検証 53
1.1　検証用立体映像撮影 54
1.2　撮影環境 55
1.3　撮影方法 56
2　実写性能評価 58
2.1　評価機器 58
2.2　評価方法 59
3　実験結果及び分析 59
4　考察 77
5　まとめ 79
第 4 章　感情情報評価と実証実験の結果及び分析 80
1　感情情報評価と実証実験 81
2　実証実験 81

2.1　心拍数について 81
2.2　実験の目的 82
2.3　仮説の設定 82
2.4　実験方法 83
2.5　実験の流れ 83
3　実験結果と考察 87
3.1　感情情報評価の結果及び分析 87
3.2　アンケートによる評価 88
3.3　実証実験の結果及び分析 105
4　まとめ 109
第5章　結論 111
謝　辞 115
参考文献 116

序　論

1　研究主旨

近年、一般家庭において立体映像コンテンツを視聴する機会は増加してきたが、制作する機会はまだあまりない。しかし3Dテレビや手軽に使える小型の一体型二眼式3Dカメラの普及により、今後、個人でも立体映像コンテンツを制作する機会が増えることが考えられる。一体型二眼式3Dカメラは、立体感を損なわずに快適に見られるためのコンバージェンスポイント[1]の自動調整機能が搭載されているものもある。しかし、ズームインの時には被写体が拡大され、コンバージェンスポイントの自動調整ができないという問題も存在する。コンバージェンスポイントの調整が行われないままズームインが行われている立体映像を見たときに、映像酔いを誘発する視覚的不具合が発生する可能性がある。しかも、ズームインまたはコンバージェンスポイントの移動によって、スクリーン面より奥にあったものが手前に出て来て奥行き感が変わってしまう距離感の変動という現象が発生する場合もある。

本研究では、立体映像制作におけるズーム機能を用いた撮影の際に発生する視覚的不具合と距離感の変動の両方を最小化する手法を提案する。

まずはズームイン前のワイドな状態でフォーカス、被写体、コンバージェンスポイントの位置によって、この三つの位置関係を9種のモデルとして分類する。そのうえで四つのコンバージェンスポイントの調整技法を提案する。この四つの技法を9種のモデルそれぞれに適用して、実写撮影による性能評価を行い、各技法を比較、優秀な技法を確立する。

また、身体反応の観点から検討するため、主観評価を行い、次は心拍数を用いた生体反応による客観的な評価を試みる。

最終的に視覚的不具合や距離感の変動を起こさない最適な技法を提案する。この研究により、安全で快適な立体映像の撮影環境を提供できるカメラの開発に活用されることが期待できる。

[1]二つのカメラの光軸の交点、つまりレンズの中心を通る線が交わる点のことを言う。

2　研究背景

2.1　立体映像の時代

立体映像の歴史は映画を中心に遷移してきた。1950年代、1980年代に続き、2010年に3度目の立体映像ブームが到来した。第一次立体映像ブームは、1952～54年にかけて起こった。この時期米国では家庭用テレビの普及が急速に進み、その影響で映画館の観客動員数が減少し始めた。これにハリウッドの映画関係者が危機感を感じ、目をつけたのが 立体映像であった。長編・短編作品併せて60本近くの3D映画が制作されたが、その後ブームは急速に終わってしまった。第二次立体映像ブームは、1982～84年にかけて起こった。米国で家庭にケーブルテレビが普及し、放映するコンテンツが不足した際に、過去の立体映画をアナグリフで放送した事がきっかけで再び立体映像の流行が訪れた。この流行を受け、ハリウッドは再び3D映画の制作を始めることになる。「ジョーズ3」や「13日の金曜日3D」など、話題作の続編が3Dで制作された。しかしこのブームもまたすぐに終わることになる。これら過去2回の立体映像ブームが一過性なものとして終わった主な原因として、ディスプレイ開発やコンテンツ制作に関する技術的な未熟さに加え、量的・質的なコンテンツの不足があげられている[2]。

第三次立体映像ブームは2009年末に公開された映画「アバター」によってはじまり、2010年は「3D元年」と呼ばれることもある[3]。しかし最近は映画館のデジタル化と3Dディスプレイ技術の発達、そして3Dカメラ技術の発達で映画やTV、ゲームなど多様な立体映像コンテンツが提供されているため、この立体映像ブーム一過性のものではなく、今後も続いていくだろうと考える。

立体映像ブームは、特に家電メーカーの立体映像周辺機器への対応に影響を及ぼした。立体映像対応テレビやBlu-rayディスクによる立体映像が再生可能なレコーダーも発売された。更に、PanasonicやSonyから民生用の立体映像撮影カメラも発売された。これによってホームビデオを立体映像で撮影する事が可能となったため、家庭でも高画質な立体映像を楽しむ事ができるようになった。

---

[2] 大口孝之、谷島正之、灰原光晴「3D世紀　-驚異！立体映画の100年と映像新世紀」ボーンデジタル、2012

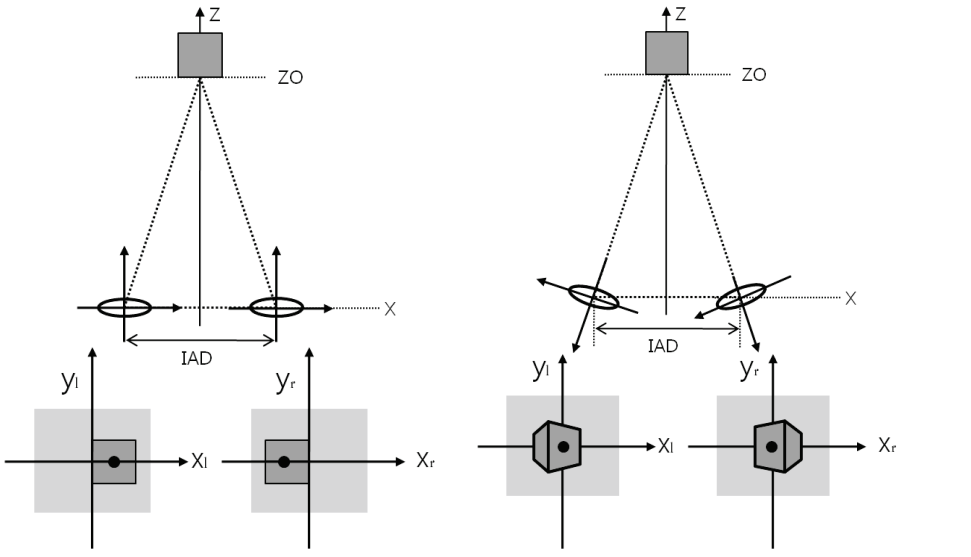
[3] 河合隆史、盛川浩志、太田啓路、阿部信明「3D立体映像表現の基礎―基本原理から制作技術まで―」オーム社、pp.3、2010

2.2　立体映像撮影機材

(1)　立体カメラ方式

立体映像の撮影方法にはいくつかの方法が提示されており、大きくは直列式と同期式に分けられる。直列式はカメラ一台を使用して左映像を撮影してカメラを移動し、右映像を撮影する方法である。カメラが発達した現在はあまり使用されてない方法である。同期式は平行法と交差法に分かれるが、平行法は 2 つのカメラを平行に配置して CCD[4]を水平方向に動かしながら映像を撮影する方法の一つであり、交差法は左右カメラの光軸が交わるように、カメラに角度を持たせて撮影する方法である。

立体カメラ方式のうち最も単純な形である平行法は、2 台のカメラを一定の間隔で平行に固定させておいて左・右の映像を撮影する手法である（図 1 左)。カメラとカメラの間の間隔が一定して構成されていて、被写体の移動にそった両眼視差を調節するコンバージェンスポイントの制御機能がない。被写体の移動による視差変化の補正が不可能なために、立体映像視聴時の目の疲労、めまいなどを感じることがある。



*ZO: Zoom In Object, IAD: Inter-Axial Distance

図 1　平行法と交差法での仕組み

両眼立体映像撮影において、被写体の距離の移動にそった両眼視差の調節のために使われる交差法は、左・右のカメラの光軸を回転させる手法である（図 1 右)。

[4]電荷結合素子（Charge Coupled Device）の略。電荷結合素子を用いたセンサー。

両眼視差(binocular disparity)とは、人間の眼球は右目と左目の間が約 6.5cm 離れており視点が違うため、右目と左目で見える映像がそれぞれ異なることである。

平行方式と違って人間の瞳の動きを模倣し、被写体が近い場合には内側に狭まって、離れた場合には広くなるものである。しかしこの方式ではやキーストーン歪曲(keystone distortion)[5]が現れる。

(2) 一体型二眼式 3D カメラの登場と種類

二眼式立体カメラが開発されて百年、日本や米国では立体カメラの問題点から指摘されてきた立体視の疲労感と視覚的不快感などの問題について先導的に研究が進んでいった。その結果、現在は様々な立体映像コンテンツを楽しむことができる時代が到来したのである。映画や放送では、3Dリグ[6]を利用して、2台のカメラを平行、あるいは直交させる方法で立体映像を制作してきた。2010年に公開された「アバター」もこの平行方式や直行方式で制作された。2台のカメラを使用する立体映像では、2台のカメラの露出、焦点距離、フォーカス、ホワイトバランスなどが厳密に同期された状況でないと正確な立体視を得られないため、一般ユーザーには制作が困難であった。

そこで、一般ユーザーが手軽に立体映像の制作を楽しめるように登場したのが、2010年に発売されたPanasonic製のAG-3DA1という一体型二眼式3Dカメラである。以降、一体型二眼式3DカメラはPanasonicをはじめ、SONYやJVCからも販売されている（図2)。

AG-3DA1(Panasonic)　　HDR-TD20(SONY)

図 2　一体型二眼式 3D カメラの種類

[5]キーストーン歪みとはカメラを交差法で配置して撮影したとき、カメラに角度をつけているため、画面の周辺部で左右の映像が歪むこと。

[6] 3D RIG(3D Stereo Rig)。左右用の 2 台のカメラを固定しシステムの総称。

一体型二眼式 3D カメラは表 1 のように大きく分けると映画や広告、3D 放送等に使用されるカメラ（ショルダー型 - 専門家用(High quality Adjustability)）と低予算制作や家庭用ホームビデオの為のカメラ（携帯型 - 一般用(Mobility Affordability)）に区分される。

表 1　一体型二眼式 3D カメラの種類[7]

分類	機種(メーカー)	焦点距離(倍率)	IAD (Inter Axial Distance)
High-quality Adjustability	PMW-TD300 (SONY)	40-280mm(x7)	約 45mm
	AG-3DP1G(Panasonic)	34-578mm(x17)	約 58mm
	AG-3DA1(Panasonic)	47.1-264mm(x5.6)	約 60mm
Mobility Affordability	HDC-Z10000(Panasonic)	32-320mm(x10)	約 42mm
	GY-HMZ1(JVC)	3.76-18.8mm(x5)	約 35mm
	HXR-Nx3D1(SONY)	2.9-29mm(x10)	約 31mm
	HDR-TD10(SONY)	2.9-29mm(x10)	約 31mm
	HDR-TD20V(SONY)	3.34-33.4mm(x10)	約 21mm

2 台のカメラを組み合わせて制作した立体映像の場合、2 台のカメラの個体差やハードウェア特性の不一致に起因するセットアップおよびパラメーター設定等の問題が発生する可能性があるが、一体型二眼式 3D カメラは一つのハードウェアに右目用と左目用の二つのレンズが搭載されているカメラである。したがって左右の映像の色合いや、画角、ズームのタイミングやスピードの同期、調整を一つの操作で行うことができるため、2 台のカメラを組み合わせたときに起こるような問題が発生する可能性は低い。さらに、2 台のカメラを組み合わせたときより二つのレンズの間隔である IAD(Inter-Axial Distance)は狭く、より快適な映像を撮影することが可能である。この間隔が狭くなると、両眼視差の量が減ることになる。

(3)　一体型二眼式 3D カメラの特徴と問題

一体型二眼式 3D カメラは二つのレンズで左右それぞれの映像を撮影し、一つの本機で自動的に奥行き感や立体感の調整を行い、自動的に水平および垂直変位や

[7] 2013 年 10 月時点での調査結果

画像の上下関係などを修正することができる。また撮影前に光軸及び画角等を調節する必要がない。そしてフォーカス、しぼり、シャッタースピード、ホワイトバランスなどの正確なセットアップ機能と奥行き感を設定するコンバージェンスポイント調整機能がほとんどの製品に備えられており、一般ユーザーが利用しやすくなった。特にズーム機能は二つのレンズの動きと焦点距離が正確に同期され、正確な値で作動する。

ここで、一般ユーザーが立体映像撮影を行う際に発生しうる最も大きな問題が、過度な両眼視差の発生である。両眼視差が大きいと、視野闘争[8]が発生する可能性がある。そこで一体型二眼式 3D カメラでは、両眼視差を調節するためにコンバージェンスポイントの調整機能がある。立体の奥行き感を調節し、視聴する人にとって安全な映像を撮影することが可能である。また、3D リグを使用した 2 台のカメラではズームすることが困難であったが、一体型二眼式 3D カメラでは二つのレンズが正確に連動して簡単にズームすることができる。

しかし、ズーム使用時にはコンバージェンスポイントの調整ができない。例えば、ズームインを行なうときは、コンバージェンスポイントになるスクリーン面が固定されたまま被写体が拡大されてしまう。このような場合、被写体とコンバージェンスポイントとの距離が遠いほど過度な両眼視差が発生するため、視覚的に不具合のある立体映像となってしまう。また、コンバージェンスポイントの動きが大きすぎると、奥行き感が急激に変化する距離感の変動が発生してしまうという問題が発生する。そこで、ズーム使用時におけるコンバージェンスポイントの調整技法が必要である。

2.3　立体映像の重要な要素

(1)　コンバージェンスポイント(Convergence　point)

人間には瞳孔間間隔が約 6.5cm ある。このためにあらゆる物体を眺めるときにその物体と目が特定の角を成すことになるが、この角を輻輳角という。距離に応じて輻輳角が一定になるように眼球が回転して、注視する点が視力と色の弁別能力に優れた網膜の中心部に入ってくるように自動的に調節し、この筋肉の作用によって対象物体との距離を判断することになる。

---

8 右目と左目で見ているものの違いが大きいと、融像できずに、脳は左右どちらの絵が正しいのか優劣がつけられなくなること。

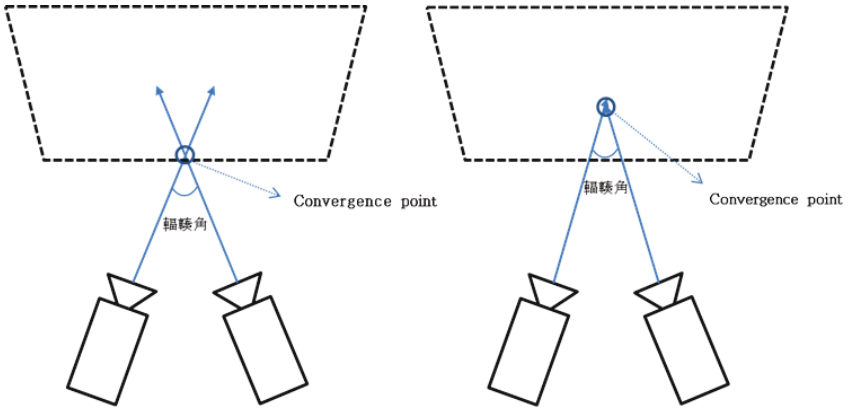


図 3　コンバージェンスポイントと輻輳角

コンバージェンスポイント(Convergence Point)は、図3のように交差法(Toed-in configuration)による二つのカメラの光軸の交点、つまりレンズの中心を通る線が交わる点のことを言う。この光軸の交点がスクリーン面になる。このスクリーン面を中心に被写体の飛び出しと引っ込みが決定される。カメラの光軸の交点をなす角を輻輳角とする。このカメラの輻輳により左右レンズの角度が変化することで、コンバージェンスポイントの位置も変化する。このコンバージェンスポイントの位置によって、飛び出して見えるか奥行きがあるように見えるかが変化する。

ここで、被写体を基準の「０」として、それよりも見る側に近い範囲を「負(Negative Parallax)」とし、その反対側を「正(Positive Parallax)」というように定める。図４に示すように、左目の像が右側、右目の像が左側にズレた時に「負の視差」、左目の像が左側、右目の像が右側のときに「正の視差」となる。

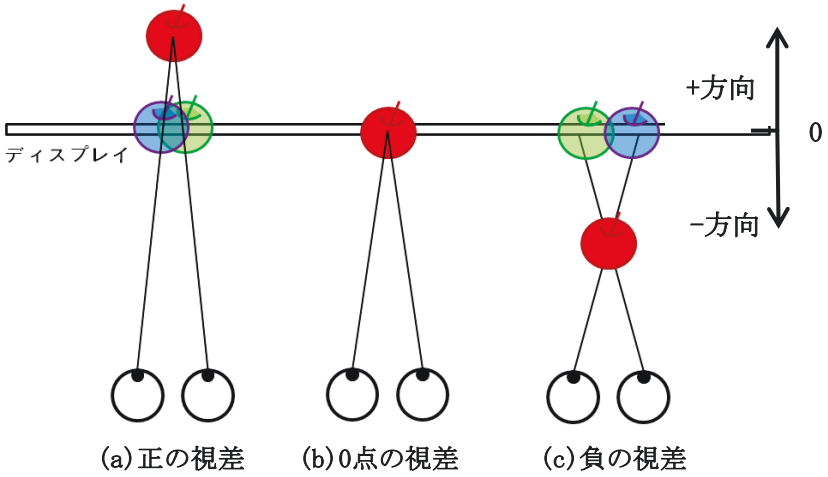


図 4　正と負の視差による立体感

コンバージェンスポイントは立体映像の立体感の基準となる点であるため、立体映像制作では重要な要素である。コンバージェンスポイントよりもカメラ側にある被写体は飛び出し、奥側にある被写体は奥行きを持つような立体視が生まれる。図5はコンバージェンスポイントの位置による視差の領域を表している。

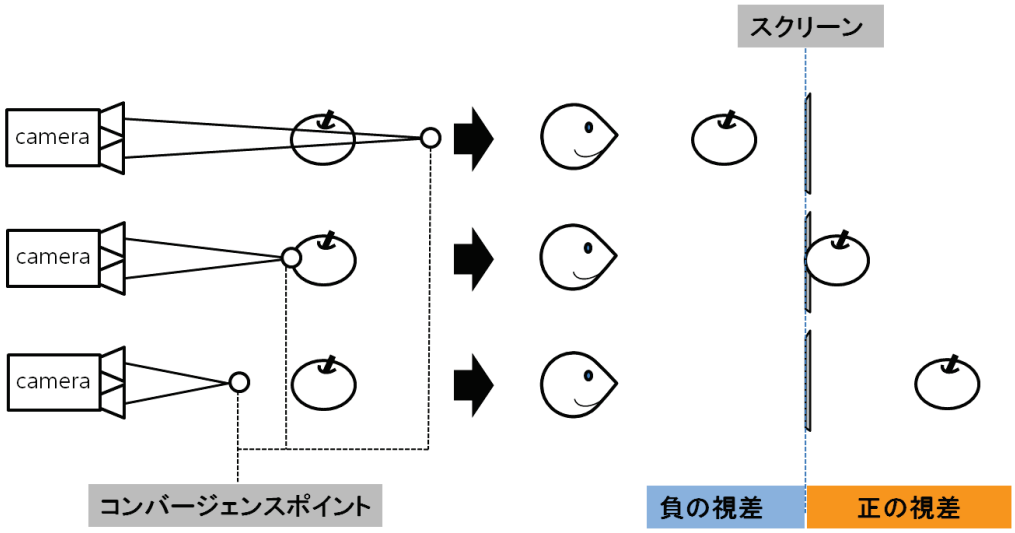


図 5　コンバージェンスポイントの位置による視差範囲

(2)　立体快適視差範囲

国際ガイドラインISOIWA3に準拠した「人に優しい3D普及のための3DC安全ガイドライン」というものがある。3DCコンソーシアム安全ガイドライン部会によって、2009年11月30日より開始された経済産業省快適3Dプロジェクトの活動の一環として過去10年の文献調査、3D研究者および事業関係者との議論が進められ、2010年に内容が全面改正された。

そこでは、次のように快適視差範囲を述べている。両眼視差による立体視では、人はディスプレイ面とは異なるところに立体像を知覚し、眼はそこに焦点を合わせようとするが、ピントを合わせるべき対象はディスプレイ面にある。これを輻輳と調節の矛盾と言い、立体視における視覚疲労、不快感の原因の一つとされている。そのため立体視を「快適に」楽しむための奥行き（飛び出しや引っ込み）範囲、すなわち快適視差範囲が存在する。過度の視差は立体視の成立を妨害や二重像を生じさせ、視覚疲労、不快感の原因となる。従来の研究や経験側によると視差角は1度(60分)以下が目安である。融合限界は個人差が大きいが、不特定多数を対象とする場合、小さめの2度(120分)程度と考えた方が無難である。構図、時

間変化等様々な要因によって許容範囲は変動するのでそれ以上を否定するものではない。時間的、空間的に急な視差角変化(1度以上)は疲労の原因となるので避けるのが望ましいと言われている。

図6はハイビジョンテレビのディスプレイにおける両眼視差の発生状況を図示したものである。

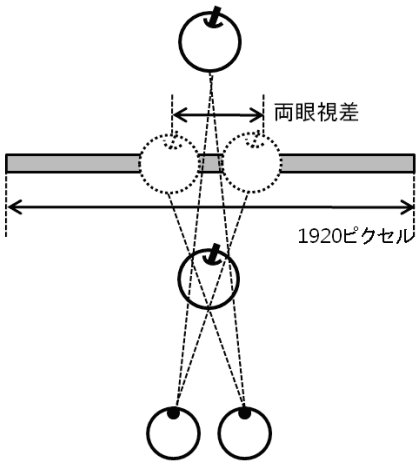


図 6　ハイビジョンテレビのディスプレイでの両眼視差の例

以下の表2はハイビジョンテレビを想定した場合の快適視差範囲を示す。

瞳孔間間隔は6.5cm、標準観視距離（テレビの画面高さの3倍距離）での視聴を前提に作成した。この条件では、実質的にテレビサイズ、瞳孔間距離によらないので汎用性がある[9]。

表 2　ハイビジョンテレビを想定した場合の快適視差範囲

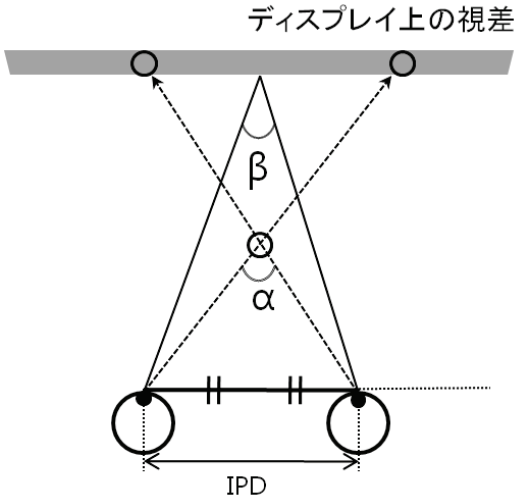
視差	ピクセル数	画面幅に対する比	
0.7度(40分)	38ピクセル	1.9%	快適範囲
1.0度(60分)	57ピクセル	2.9%	
1.5度(90分)	85ピクセル	4.4%	
2.0度(120分)	113ピクセル	5.9%	

（水平ピクセル数 1920 の場合）

[9]3D Consortium「3DC Safety Guidelines for Popularization of Human-friendly 3D」 3D Consortium, 2010.

この視差角と映像の視差、すなわち画面上のピクセル数の関係性を、数式によって明らかにしていく。

ここで、視差角とは画面やスクリーンを見ているときの輻輳角をβとし、立体像を見ているときの輻輳角をαとしたとき、この二つの角度の差のことを表す(図7参照)。これを式で表すと、視差角＝｜α－β｜となる。



* IPD: Inter-pupillary Distance

図7　ディスプレイ上での視差

視差角から視差を求める方法として、スクリーン（画面）の幅、目の幅、解像度、視聴者とスクリーンの距離の数値を用いる。本研究では最終的に行う検証に用いるディスプレイとして、55インチの3Dテレビを選定したため、スクリーン（画面）の幅は121㎝、目の幅は成人を対象とするため、一般的な幅の6.5㎝、解像度は1920ピクセルである。また、視聴者とスクリーンの幅であるが、これは3DC安全ガイドラインの標準観視距離である「画面の高さの3倍」（図8）という値に基づいて、画面の高さ68.5㎝の3倍で205.5㎝とする。

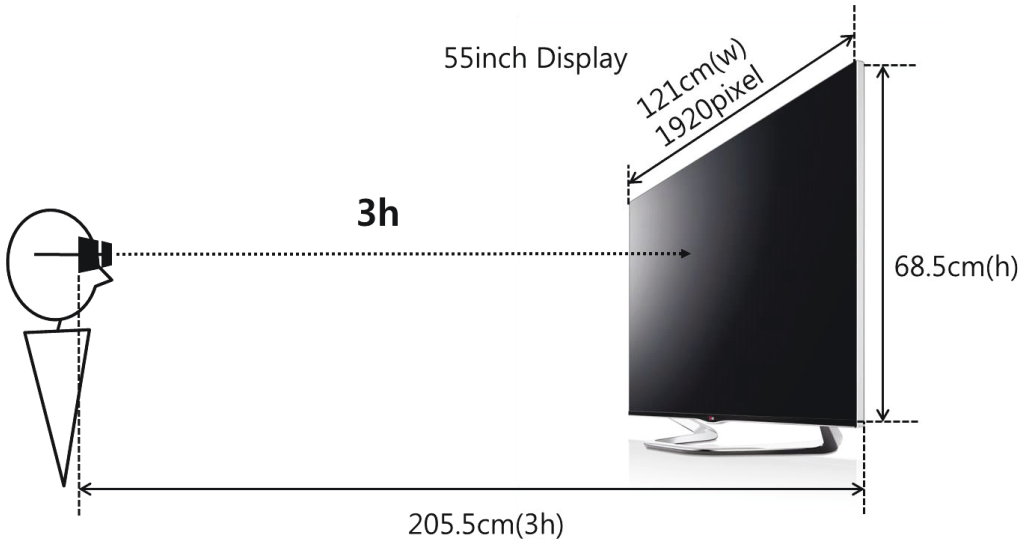


図 8　快適な視聴距離

以上の数値を用いて、まずは飛び出しの場合の視差角 1 度、つまり視差を求める。以降の計算は『よくわかる S3D 立体映像制作』（宮島英豪著）を参考に行ったものである。

初めに図 9 のような画面上で交わっている左右の光軸と両眼を結んだ三角形を中心で二分し、その後にできる三角形の角度をβ’とする。

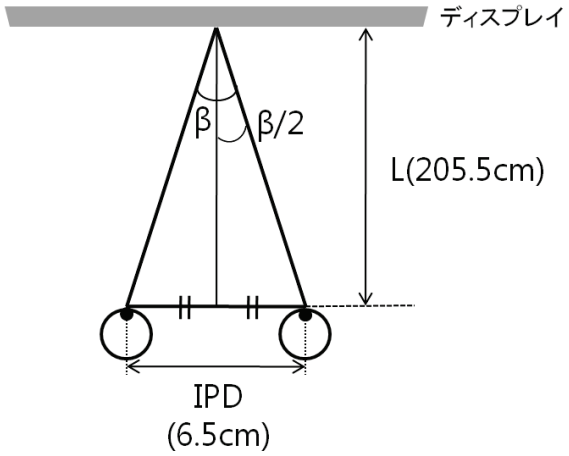


図 9

このとき、β/2 の角度を次のように求めることができる。

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)=\frac{\frac{\mathrm{IPD}}{2}}{\mathrm{L}}=\frac{3.25}{205.5}$$

$$\therefore \frac{\beta}{2}=\tan^{-1}\left(\frac{3.25}{205.5}\right) \qquad (1)$$

$$=0.0158137\cdots(\mathrm{rad})$$

図 10 のように、同様にして飛び出した立体像で作られる三角形を二分した三角形の角度をα’とする。α’とβ’の角度はそれぞれの輻輳角αとβの半分であり、視差角であるα－βが 1 度なので、α’－β’は 0.5 度となる。1 度は約 0.017444（rad）なので、0.5 度は約 0.008722（rad）となる。

これを踏まえてα‘の角度を次のように求めることができる。

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)=\frac{3.25}{\mathrm{L}}$$

$$\therefore \frac{\alpha}{2}=\tan^{-1}\left(\frac{3.25}{\mathrm{L}}\right)$$

$$\left|\frac{\alpha}{2}-\frac{\beta}{2}\right|=\frac{1^\circ}{2}=0.5=\frac{\alpha}{2}-\frac{\beta}{2}$$

Positive の場合

$$\therefore \frac{\alpha}{2}=\frac{\beta}{2}+0.5 \quad (2)$$

Neagtive の場合

$$\frac{\alpha}{2}=\frac{\beta}{2}-0.5 \qquad (3)$$

$$\frac{\alpha}{2}=0.0158137+0.008722$$
$$\fallingdotseq 0.0245937\ (\mathrm{rad})$$

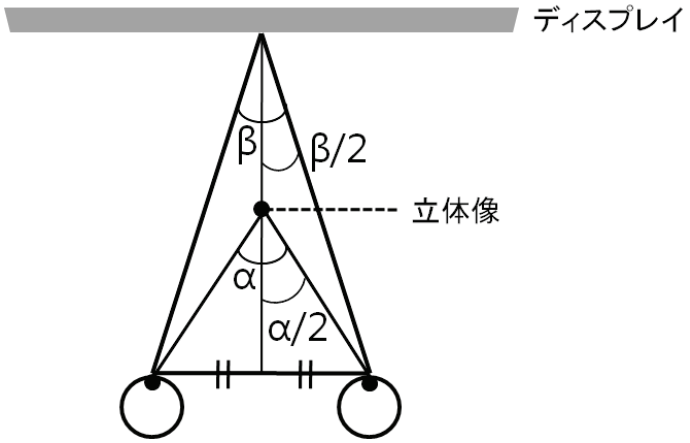


図 10

次に図 11 のように飛び出しの立体像上で交わる光軸を延長して、画面上まで伸ばして作られる三角形との相似関係から、像のズレ幅 x’ を求める。

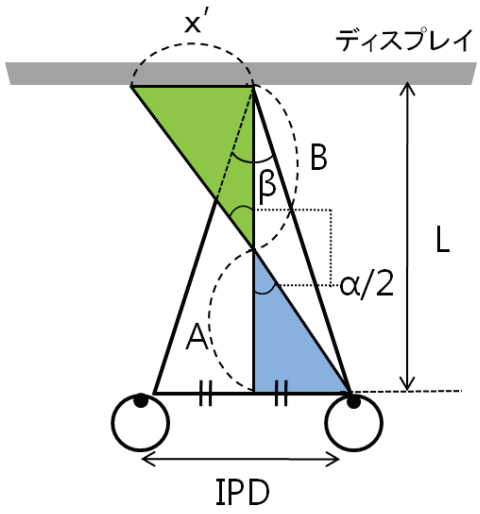


図 11

図 11 の立体像までの距離 A は次のように求めることができる。

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{\beta}{2} - 0.5$$

$$A : \frac{IPD}{2} = B : x'$$

$$\therefore x' = \frac{B\frac{IPD}{2}}{A} \qquad (4)$$

$$\tan\alpha' = 3.25 \div A$$

$$A = 3.25 \div \tan\alpha'$$

$$= 3.25 \div 0.0245937$$

$$\fallingdotseq 132.14766\ (\text{cm})$$

A の長さとＢの長さ 205.5 ㎝利用して、立体像から画面上までの距離 B を求めることができる。

$$B = 205.5 - 132.14766 \cdots$$

$$\fallingdotseq 73.35234\ (\text{cm})$$

B の長さが明らかになったので、三角形の比を利用して x’を求める。

$$A : 3.25 = B : x'$$

$$x' = B \times 3.25 \div A$$

$$= 73.35234 \times 3.25 \div 132.14766$$

$$= 1.80400 \cdots (\text{cm})$$

画面上のズレ幅、つまり視差 x は x’の 2 倍の大きさなので、

$$x = x' \times 2$$

$$= 1.80400 \times 2$$

$$\fallingdotseq 3.60801\ (\text{cm})$$

ここまでで、55 インチにおける視差角 1 度の画面上の視差が約 3.60801 ㎝という値が求められた。これを編集時に利用しやすいようにピクセルに変化すると、約 57 ピクセルとなる。

$$\text{視差 X（ピクセル）} = 1920 \times 3.60801 \div 121$$

$$= 57.2510 \cdots (\text{ピクセル})$$

2.4　立体映像が引き起こす問題

立体映像において、コンバージェンスポイントの位置が重要であることは先に述べたとおりである。しかし、コンバージェンスポイントの調整がうまくいかないと、鑑賞者が視覚疲労を感じる要因となる。そのため立体映像が起こす問題のうち、コンバージェンスポイント調整の不具合によって発生する両眼視差が引き起こす視覚疲労とズーム時に発生する問題について調べる。

(1)　両眼視差による視覚疲労

立体視は多くの奥行き手がかりによって支えられており、これは表3のように３つの要因に大別することができる[10]。

表３　立体視における奥行き手がかり

眼球の手がかり	レンズ調節、輻輳
「ずれ」の検出による手がかり	運動視差、両眼視差
画像性の手がかり （心理的手がかり）	遠近法、大きさ、テクスチャー勾配、陰影、 重なり合い

このうち両眼視差は、現在ほとんどの3Dディスプレイ装置で立体感を感じる仕組みとして活用されている。3Dディスプレイ方式は両眼視差によって立体感を表現し、基準面から飛び出したり引っ込んだりする空間を再現する。しかし、コンバージェンスポイントの調節と両眼の輻輳の関係を守らないまま長時間視聴することになると、めまいや頭痛などを招く場合がある。このような症状に影響を与える諸要因の情報を総合的に調節することによって、抜本的な視覚疲労度を減少させる必要がある。現在、日本や米国を中心に3D立体映像が観客に与える影響やめまい症や不快感を誘発する原因について究明する研究が行われている。現在まで明らかになったところによると、立体視でめまいや不快感と同じ立体疲労感を誘発する主な原因は、3D画像の表示位置と立体画像の再現位置が一致しないことが挙げられる。さらに、立体画像の再現位置が変化することで引き起こされる両眼視差の変化がさらに脳内での情報処理を混乱させるため、視覚疲労が誘発され

[10]佐藤隆夫『立体視の視覚心理』
『立体視テクノロジー―次世代立体表示技術の最前線―』エヌ・ティー・エス、pp. 39、2008 より

ることになる[11]。

ニューヨークマンチェスター大学(Manchester University、New York)の眼科、神経学科教授のフリードマン(Friedman)博士は「人の目はお互いに少し違う角度から物を見る。これを脳で処理して奥行きを認識することになるが立体映像は観客の目と角度が正確に一致しない。脳はこれを正すために多くの仕事をしなければならずこのために頭痛が起こることがある。」と指摘した[12]。

また、撮影カメラの水平不均衡についても、左右のカメラの収束不均衡と再生環境の正規化(calibration)の不均衡によって生成されるため、深刻な光学的問題である[13]。

また、両眼のレンズの収束の不均衡は、両眼カメラが被写体の距離の変化に応じて適切に調節されなかったときに発生する。再生環境の不均衡は、立体映像視聴時の視聴の位置やディスプレイ機器のサイズ、解像度と同じ立体映像再生環境を適切に調節することができないために発生する。まだすべての原因が明らかになったわけではないが、これまでの視覚疲労を誘発し得る原因は、両眼の視線の収束と調整や焦点調節運動に影響を及ぼしているものとみられる。

(2)　ズーム時に発生する問題

ズームレンズとは焦点距離が変わりながらレンズの画角が変化するレンズを言い、可変焦点レンズとも言う。ズームレンズは一つのレンズで多様な焦点距離で表現することが可能であり、主にビデオ方式の放送用カメラや民生用のハンディカムによく使われる方式である。

レンズによる撮影範囲がどのくらいであるかを表すものとして画角がある。焦点距離が短い広角レンズは画角が広く、焦点距離が長い望遠レンズは画角が狭い。つまり、ズームインをするというのは焦点距離が長くなり画角が狭くなるということを意味する。また、広角レンズから望遠レンズに変わることで、倍率が高くなるということになる。図12はSony社の3Dカメラ、HDR-TD10を例にとったものである。焦点距離2.9㎜の広角な状態は画角が非常に広く、多くの情報をとらえることができる。しかしズームインと同時に画角が狭くなるため、最大にズームイン

[11]井口信和　「長時間死人における疲労を抑制した立体映像表示システムの開発」『立体視テクノロジー―次世代立体表示技術の最前線―』エヌ・ティー・エス、pp594、2008 より

[12]Bernard Mendiburu「3D Movie making Stereoscopic Digital Cinema from Scriptto Screen」Focal Press,2009.

[13]Miyasita T & Uchida T, 「Cause of Fatigue and its Improvement in Stereoscopic Displays」Proceedings of Society for Information Display, Vol.31, pp.249~254, 1990.

された状態の29㎜では被写体が画面いっぱいに埋まってしまい、被写体以外の情報をとらえるのは困難になる。

特に2つのレンズが最大限ズームインをすると、2つのレンズ間の両眼視差がより一層大きくなると考えられる。この時に立体視の奥行き感を左右するコンバージェンスポイントを固定することで、更に大きな両眼視差の発生が予想される。

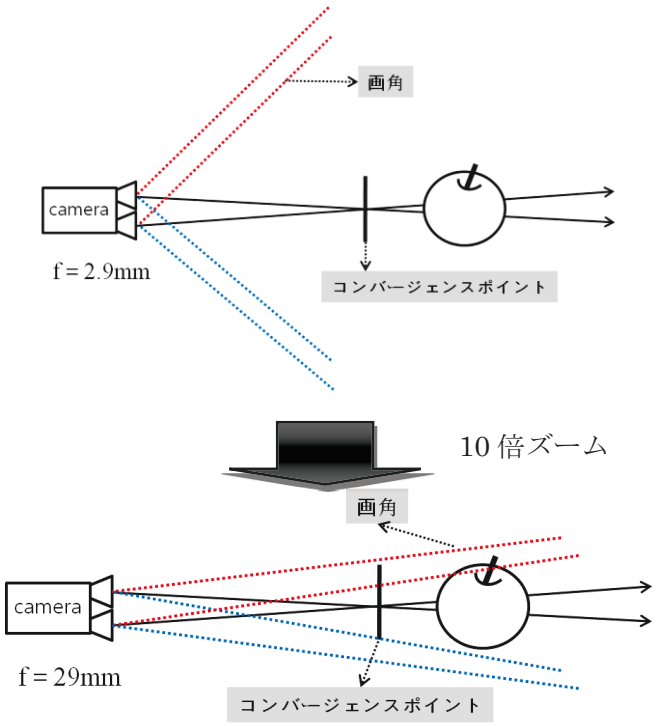


図 12 ズームによる画角変化

一体型二眼式3Dカメラは一眼カメラのように簡単で便利なズーム機能が二つのレンズに正確に同期されている。一般ユーザーでも簡単にズーム機能を使用することができる。しかし、現在の一体型二眼式3Dカメラでは奥行き感を決めるコンバージェンスポイントはズームと一緒に動かない。したがってコンバージェンスポイントが固定されたままズームインをする場合、被写体だけが高倍率で拡大され過度な両眼視差が発生してしまうという問題がある。

例えば図13の(a)の絵のようにズームイン前のワイドな状態で被写体より近い場所にコンバージェンスポイントを置いてもずれが小さく違和感がない。しかしズームイン後では、(b)の絵のように被写体が高倍率で拡大されてしまい左右映像の差異が大きくなるため、過度な両眼視差が発生してしまう。

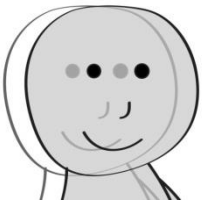
	
(a) Before zoom-in	(b) After zoom-in

図 13　ズームによる両眼視差の変化

ここで、ズーム時に発生する問題として次の二つの用語を定義する。

① 視覚的不具合(Visual discomfort)

人間の両眼が取り込む映像の差異を両眼視差という。この両眼視差の差異の大きさに従って奥行き感のズレは比例して大きくなる。したがって、奥行き感のズレが大きくなるほど視野闘争が発生し、視覚的不具合を感じるようになる。この時に現れる不快感は両眼が注視する注視点と目の焦点距離の不一致によって発生する。3DCではコンテンツ制作者の為の快適視差領域(comfort zone)条件として1度の両眼視差を勧告している。そこで本研究では、両眼視差が1度を超える場合を視覚的不具合が発生すると定義する。

② 距離感の変動(The change of visual distance)

距離感の変動とは、ズームインまたはコンバージェンスポイントの移動によって飛び出しと引っ込みの両空間や立体的な奥行き感が変わってしまう事である。例えばズームイン前には飛び出す側にいた被写体がズームイン後に引っ込み側に移動してしまうことを言う。本研究ではこういった現象を距離感の変動と定義する。

2.5　先行研究調査

立体映像の重要な要素や発生しうる問題を踏まえ、快適に鑑賞することができる立体映像の撮影方法、および快適な映像かどうかを評価する手法を探るため、関連する先行研究の調査を行った。

『観察者が立体視で好む奥行き提示位置の検討』において、鑑賞者が好ましいと思う立体視画像の奥行き呈示位置について言及されている。この研究では、2種類の立体映像対応ディスプレイを用意し、鑑賞者が同一の立体映像コンテンツを鑑賞した場合における各ディスプレイの快適な奥行き呈示位置の算出を行っている。その結果、個人差はあるものの、好みの奥行き位置がディスプレイ画面より奥と手前にそれぞれ存在することが判明した。さらに、鑑賞者が好ましいと感じる立体映像は、「スクリーン面の前後の快適な範囲内までである」という言及がされている[14]。鑑賞者が立体映像に期待していることは、映像がスクリーンから飛び出したり引っ込んだりすることである。しかし過度な飛び出しや引っ込みは、かえって不快感を与えることになる。本研究ではこの研究を参考に、立体映像の特徴である飛び出しや引っ込みを維持しつつ、観る人が不快感を覚えない立体映像制作のため、撮影時のズームの使い方をコンバージェンスポイントの使い方に着目して改善していく。

『立体映像注視時の視覚反応-生体反応計測へのアプローチ-』では、立体映像視聴時の生体反応として調節応答、両眼視差、脳内血流変化を取り上げ検討したものである。その結果、調節反応は実物のものをみるときに似た反応を示し、脳内血流変化において、健常者の 3DCG 映像鑑賞時の後頭葉視覚領の脳血流量変化は 2DCG 映像視鑑賞時と比較して増大したという結果が出た[15]。この研究は、立体映像の安全性を、主観評価というあいまいなものではなく、生体反応という客観的な視点からとらえており、その信頼性は確かなものであると考える。したがって本研究においても、ズーム使用の安全性の指針を作るため、生体反応計測を取り入れていく。

『立体映像による視覚疲労に関する評価』では、二眼式によるシステムで視覚疲労感に関する主観評価を行った。一つの液晶ディスプレイ上に偏光板を貼り付け偏光眼鏡を装着して映像を鑑賞する、という環境下において立体感が損なわれず、かつ疲労感の少ない映像の条件を検討したものである。その結果動きが早い、背景や被写体が細かい、といった条件では他の方式同様、疲労感が感じられたが、平行法と交差法を用いた映像に関しては、疲労感を感じた被験者が少なかったと

[14]小林秀明、浅井紀久夫「観察者が立体視で好む奥行き提示位置の検討」ITE Technical Report、Vol.34、No.12、pp.5、2010

[15]半田知也「立体映像中止時の視覚反応―生体反応計測へのアプローチ―」ITE Technical Report、Vol.34、No.24、pp.19、2010

いう結果が出た[16]。この研究結果をもとに、本研究では、疲労感を感じにくく人が普段ものを見るときと同様の見方をする交差法を使用する。そのうえで背景と被写体、そしてズームの動きを、コンバージェンスポイント調整と連動させるという提案を行う。

『両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因』は、過度な視差による視覚疲労要因に関して主観評価を行った研究である。その結果、輻輳性融合によって知覚される静止 3D 画像に関しては、視覚疲労が少ないことを示した。被写体が動いている立体映像に関しては、立体画像が奥行き方向に動きがあると視覚疲労が生じやすいという結果が出ている[17]。

これらの先行研究の結果のように、過度の視差は視覚疲労を生じやすいため、ズームインによる過度の視差を防止するためには、コンバージェンスポイントの調節が不可欠であると考える。しかし、いずれの研究においてコンバージェンスポイントに焦点を当てた研究は見受けられない。そこで本研究では立体映像撮影時におけるコンバージェンスポイント調整技法を考案し、立体映像を安全かつ快適に撮影するためのズーム機能を提案する。

3　研究目的

3DTV とともに一体型二眼式 3D カメラも一般家庭に普及している。一体型二眼式 3D カメラは気軽に撮影が可能であり、しかも小型なモデルが多く、フルハイビジョンはもちろん GPS 機能の搭載、奥行き感を自動視差調節することも可能である。これまでは立体映像は 2 つのカメラで撮影していたため、FIX（固定）撮影が中心で、表現においてもパンフォーカスが中心であった。しかし、一体型二眼式カメラの登場で、立体映像撮影におけるカメラワークの表現の幅が広がってきた。特にズーム機能の使用は、その最たる例であるといえるだろう。しかし、ズーム使用時には自動視差調節ができないという短所がある。特に一般ユーザーはズームを過度に使用する傾向がある。

そこで本研究の目的は、立体映像撮影においてズーム機能を用いた際に発生する視覚的不具合と距離感の変動を最小化するコンバージェンスポイント調整技法を

[16]中村隆、野尻麿、阿部夏希、佐藤甲葵「立体映像による視覚疲労に関する評価」ITE Technical Report、Vol.27、No.21、pp.21、2003

[17]矢野澄夫、江本正喜、三橋哲夫「両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因」映像情報メディア学会誌 Vol.57、No.9、pp.1187、2003

提案することである。将来的には、本研究が機械によって体系化され自動化されることで、誰でも簡単、安全に使用できるズーム機能を搭載した 3D カメラの開発に役立つことが期待できる。

4　研究方法

本研究では、立体映像制作におけるズーム機能を用いた撮影の際に発生する視覚的不具合と距離感の変動を最小化する手法を提案するため、次の四つの方法で研究を行う。

第一に、 3D カメラでコンバージェンスポイントがフォーカスの位置によって構成されるモデルを明らかにしていく。現在、開発されている 3D カメラには、人々が簡単に撮影できるように AE(Auto Exposure)、AF(Auto Focus)などの機能がついている。本研究での最終目標は 3D カメラによる撮影の際、オートフォーカス機能を前提とする、ズーム機能と連動したオートコンバージェンスポイント技法の開発である。そのため、コンバージェンスポイントとフォーカスとの距離による関係モデルを明らかにする必要がある。

第二に、フォーカスによるコンバージェンスポイントを移動させる技法を確立していく。オートフォーカスのようにズーム機能と連動したオートコンバージェンス技法を開発するためには、ズームイン前とズームイン後のフォーカス、コンバージェンスポイント、被写体のそれぞれの位置を整理する必要がある。ズームインの前後の状況を明確にするのが、カメラから被写体までの距離である。オートフォーカスと同時に、フォーカスと被写体の距離を基準にコンバージェンスポイントを調整できる手法を提案する。

第三に、実写による 3D-BOX[18]による性能評価を行い、各技法による視覚的不具合と距離感の変動の発生頻度を検討して優秀な撮影技法を提案する。

第四に、提案された四つの技法を人間の生体反応で比較するために、実写映像を視聴した際の刺激を主観評価及び心拍の計測による客観評価を行って検証する。最終的に提案された技法の全体的な比較を行い、最も優秀な技法を確立する。

[18]SONY MPE-200、MPES-3D01 を使い、画面の中の近い所と遠い所の両眼視差データを集計する装置。

5　立体映像研究における本研究の位置づけと論文の構成

立体映像に関連する研究は、大きく 4 つの分野に分けて研究が進んでいる。まずは、人の立体認識メカニズム分野、各種立体表示技術分野、立体映像・画像表示技術の最新応用分野、そして最後に、立体視が及ぼす心身への影響と評価・安全性対策分野である。人の立体認識メカニズム分野では、立体視の特性や視覚心理などの研究が行われており、各種映像表示技術では、３D ディスプレイやパララックスバリア方式の 2 次元、3 次元表示ディスプレイの研究がなされている。最新応用分野では、医療分野、通信・コミュニケーション分野などで研究が進んでおり、安全性の分野では視覚疲労などの悪影響を防止する技術の研究が行われている。本研究はこの 4 つの分野の中では安全性対策分野での研究であるが、このうちズームとコンバージェンスポイントの調整に関する研究は存在しない。立体映像に関する研究は、そのほとんどがハードウェアの技術開発についての研究である。本研究もハードウェアについての研究であるが、研究が進んでいないズームとコンバージェンスポイントの調整に着目し、誰でも簡単で安全に立体映像が撮影できるようにコンバージェンスポイント移動技法を提案するものである。よく使われるズームの機能に、コンバージェンスポイントと連動して、快適で見やすい立体映像を撮影できるようにする。このように安全で快適な立体映像の撮影を簡単に行うことができるようになること、そして立体映像における表現手法としてズームを取り入れて制作することができるようになる、ということが立体映像分野における本研究の位置づけである。

本論文は5章構成である。序論では、一体型二眼式3Dカメラの特徴と問題点や、立体映像の重要なポイントとなる立体視に関する理論、立体映像が引き起こす問題点を取り上げた。さらに、一般に起こりやすい立体視の問題点と直結しているコンバージェンスポイントの調整に着目し、研究目標を立てた。そのうえで快適な立体視を求めるための理論的背景と先行研究の調査・分析を行い、本研究の位置づけを明確にした。

第 1 章では、専門知識がない一般ユーザーが撮影した立体映像の問題点から研究仮説を提唱し、実験を行う。研究仮説は二つある。まずは「コンバージェンスポイントが動かないと視覚的不具合とが発生する」という説と「ズームイン前後の奥行き感を維持しないと距離感の変動が発生してしまう」という説である。この仮説を元に 3DCG の映像で予備実験を行い、その結果を分析する。

第 2 章では、ズームを使用したコンバージェンスポイントの調整のため、ズームイン前のワイドな状態でのフォーカス、被写体及びコンバージェンスポイントのそれぞれの位置に従った、これらの 3 つの関係モデルを 9 種類に分類する。そしてこのモデルに 4 つのコンバージェンスポイントの調整技法を提案し、フォーカス、被写体及びコンバージェンスポイントの位置による、距離に関する数式を各技法別に提案する。

第 3 章では、提案する各技法の性能評価を行うため、実写で撮影した映像を 3D BOX を使用して評価を行う。9 ケースのモデルに四つの技法を当てはめ、各ケース別に 1ｍから 4m の間隔の四つの距離に分類して撮影する。撮影した映像から得られた数値を分析し、各技法の性能評価を行う。

第 4 章は、前章の性能評価を身体的変化の観点から検証するため、印象評価実験すなわち主観評価の実験を、被験者を対象に行う。また、心拍数を用いた生体反応による客観的な評価を試みる。

第 5 章は、序論での問題提起に対応する結びの章である。第 1 章から第 4 章までにわたる考察・検証に基づき、立体映像撮影時のコンバージェンスポイント調整について、結論を導く。そして本研究の新規性と独創性を明らかにし、残された課題と今後の展望について言及する。

本論文の全体構成内容を次ページの図 14 に示す。

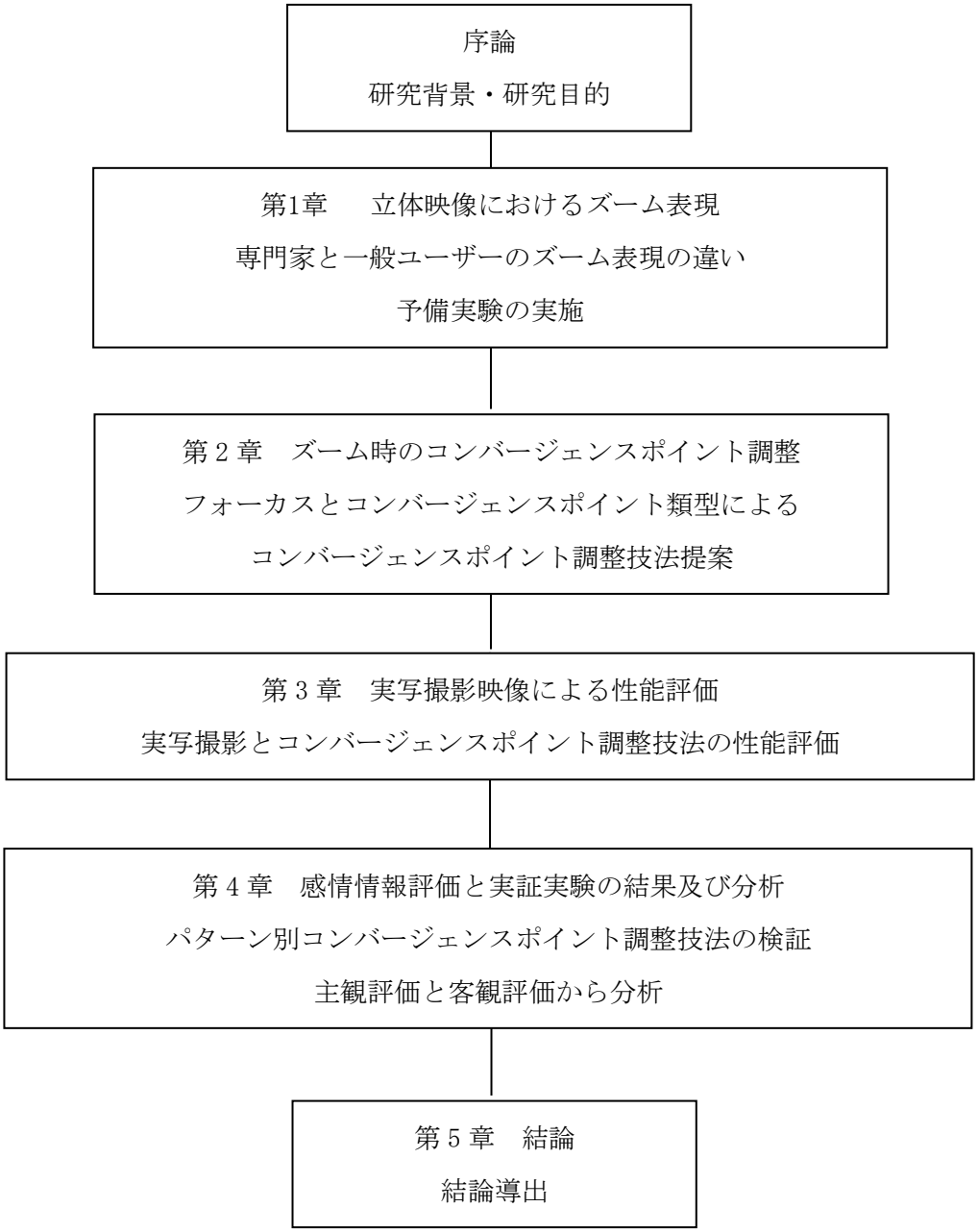


図 14　本論文の全体構成図

第 1章　立体映像におけるズーム表現

序論では両眼視差を視覚的不具合が起こる要因として取り上げたが、両眼視差のズレはコンバージェンスポイントの位置とズームの関係に起因しているのではないかと考えられる。

そこで本章では、ズームとコンバージェンスポイントの関係で起こり得る問題点を調べる。それと立体視の専門家が制作している立体映像を調べ、専門知識がない一般ユーザーとの違いや問題点を取り上げる。そこから問題提起を行い、立体映像の問題点から研究の仮説を立てる。導き出された仮説を元に 3DCG の映像で予備実験を行う。

1　問題提起

1.1　立体映像撮影の問題

立体映像の鑑賞時、両眼はディスプレイを注視しているが、映像の奥行き感によって両眼の視差が変化することで、目の疲れなどの問題点が発生する可能性がある。専門家による立体映像の撮影は、両眼視差の問題に配慮した細密な調整が行われている。しかし専門知識のない一般ユーザーはそれを無視した撮影をしているため、問題が発生する恐れがあるのではないかと考えられる。

1.2　専門家の立体映像撮影

ジェームズ・キャメロン監督の「アバター」のように興行収入で大きな成功を収めた最近のハリウッド3D映画は、長時間視聴の疲労を軽減し見やすくするために、画面幅に対して、奥行き方向、飛び出し方向とも概ね2%程度以下で作られている[19]。このように専門家が撮影を行う時には、全体的な流れを考えて事前に奥行き感を正確に決めてから撮影に入る。

[19]3D Consortium「3DC Safety Guidelines for Popularization of Human-friendly 3D」3D Consortium, 2010.

図15はハリウッド映画「Coraline 3D」、「Meet The Robinsons 3D」、「Bolt 3D」などに参加した3D専門家Brian Gardnerが制作したデプススクリプト(Depth Script)である。図15のグラフの下段部分に濃い黒色に表示された線があるが、この線がスクリーン面を示している。濃い黒色線を基準とした上の部分はスクリーンから飛び出して出る部分、つまり負の視差領域(negative parallax)を示し、下の部分はスクリーンの奥に入って引っ込んで見える部分、正の視差領域(positive parallax)を示す。このような水平線以外にも点で構成された垂直線は映画の各シーケンスを構成するカットを意味する。表の基本になるこのような線以外にも色で表示された線が4種類あるが、それぞれの線は以下に記したオブジェクトに関するデータである[20]。X軸は時間を示し、Y軸は解像度2Kシネマの場合の、左右の映像のズレのピクセル数の差である。

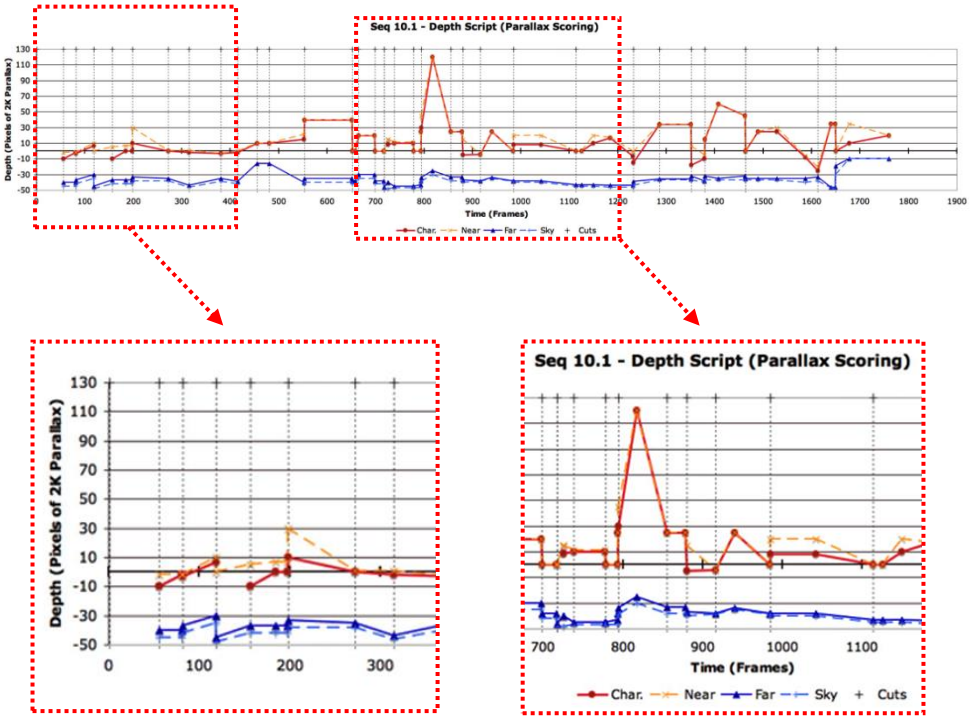


図 15　Depth Script の例(Brian Gardner)

- 赤い線

P.O.A(Point Of Attention)、フレームの中で最も重要なオブジェクト、または、見る側の目と耳を最も集中させるオブジェクトである。

[20]Brain Grdner「Creative COW Magazine -Steroscopic 3D-」Creative COW pp.9~10, 2009.

- オレンジ色の線

観客に最も近いオブジェクト。人はもちろん物体もこれに該当する。

- 青い線

観客から最も遠く見えるオブジェクト。シーンごとによって異なるが、概ね山、木、壁(室内の場合)などがこれに属する。

- 空色の線

空を表示する。もちろん撮影するシーンが室内にある場合、この線は消えることもある。

一方、3D放送の分野では、2010年7月8日に、世界初となる日本のプロ野球公式戦の3Dライブ中継が実施された。パナソニック、NTTぷらら、阪神タイガース、毎日放送の4社は、NTTぷららが提供する映像配信サービス「ひかりTV」のテレビ視聴サービスである「ひかりTV STYLE1 ハイビジョン」において、試合開始の午後6時から試合終了までの3D完全ライブ中継を行なった（図16)。

立体映像技術の統括プロデュースはもちろん、3D放送技術、2D-3D変換技術、サイドバイサイドエンコード技術、3Dテロッパ技術、3D中継技術など様々な技術者が協力して制作されたものである。撮影に際しては、細かくカットを割らないことや、カメラを速く動かさない、急なズームを行なわないといった点で、立体映像の特性に配慮したものである。

図16　プロ野球公式戦の3Dライブ中継の様子[21]

[21]AV watch
http://av.watch.impress.co.jp（2013.11.18確認）

このように、3D映画や3D放送では数多くの専門家たちが協力して、視聴の際の疲労軽減と見やすさを目指した制作活動を行っている。特に、立体映像の特性に配慮して、急なズームを行なわないように尽力している。

1.3　一般ユーザーの立体映像撮影

現在、3DTVの普及と民生用の一体型二眼式3Dカメラの普及により、一般ユーザーも立体映像コンテンツを制作できるようになった。特に一体型二眼式3Dカメラは一つの本体で2つのレンズ両方の面倒な調節ができるなど、一般ユーザーも簡単に撮影することができるようになった。奥行き感の調節、つまりコンバージェンスポイント調節装置も簡単に操作できるように設計されている。しかし、このコンバージェンスポイントはズームを使うときには調節できない。図17のように一般的なハンディカムのビデオカメラはカメラグリップに手を挟んで片手で撮影しやすくなっている。普通、親指で録画とストップを調節しながら、人差し指と中指でズームボタンを押して調節する。この指3本だけでも簡単に録画できるようになっていたということで、一般ユーザーが撮影した動画を見ると過度なズームを使った事例をよく見られる。

違和感がない立体映像を撮るためには、ズームと同時にカメラのコンバージェンスポイントも併せて調整しなければならない。

図17　ハンディカムのズームボタン

2　仮説の設定

コンバージェンスポイントが固定された状態でズームをすると過度な両眼視差

が発生してしまう可能性がある。その中でも一般ユーザーは過度なズームを使用しがちであるため、更に大きな視覚不具合が発生するのではないかと思われる。

本研究では一体型二眼式3Dカメラのズーム時に発生し得る違和感や視覚的不具合を防止するため、ズーム使用によるコンバージェンスポイントの最適な調節量を検討するため、以下の二つの研究仮説を立てた。

仮説1「オートフォーカスと同じ距離値でズームインと同時に被写体にコンバージェンスポイントを合わせると、視覚的不具合がない快適な映像を得ることができる」

オートフォーカスの原理は大まかに被写体の露出比や赤外線で距離を測定するというものである。このとき表れる距離の値をコンバージェンスポイントに適用すれば、快適な映像を得ることができると考えられる。本章では、まずCGを使用して同一の結果が出るか検証を行う。

仮説2「被写体にコンバージェンスポイントを合わせると被写体がスクリーン面になるが、ズームイン前の被写体の奥行き感（飛び出しや引っ込み）を維持すれば違和感が発生しない」

ズームイン前の被写体が飛び出しや引っ込みだったときに、ズームインとともにスクリーン面に来てしまうなら立体感の変化を感じると考えられる。仮説1と同様にCGを用いた検証を行う。

序論で述べたように、両眼視差が1度を超えて快適視差範囲を越えてしまうことを視覚的不具合(visual discomfort)、飛び出しと引っ込み両空間や立体的な奥行き感が変わってしまうことを距離感の変動(the change of visual distance)と用語定義する。

3　3DCG による予備実験

提示した二つの仮説を検証するために、3DCG 環境下で予備実験を行う。3DCG 環境は Autodesk 社の 3ds MAX プログラムを利用し、被写体とコンバージェンスポイントの位置変化によって実験方法を三つに分けて行った。実験モデルを図 18

に示す。

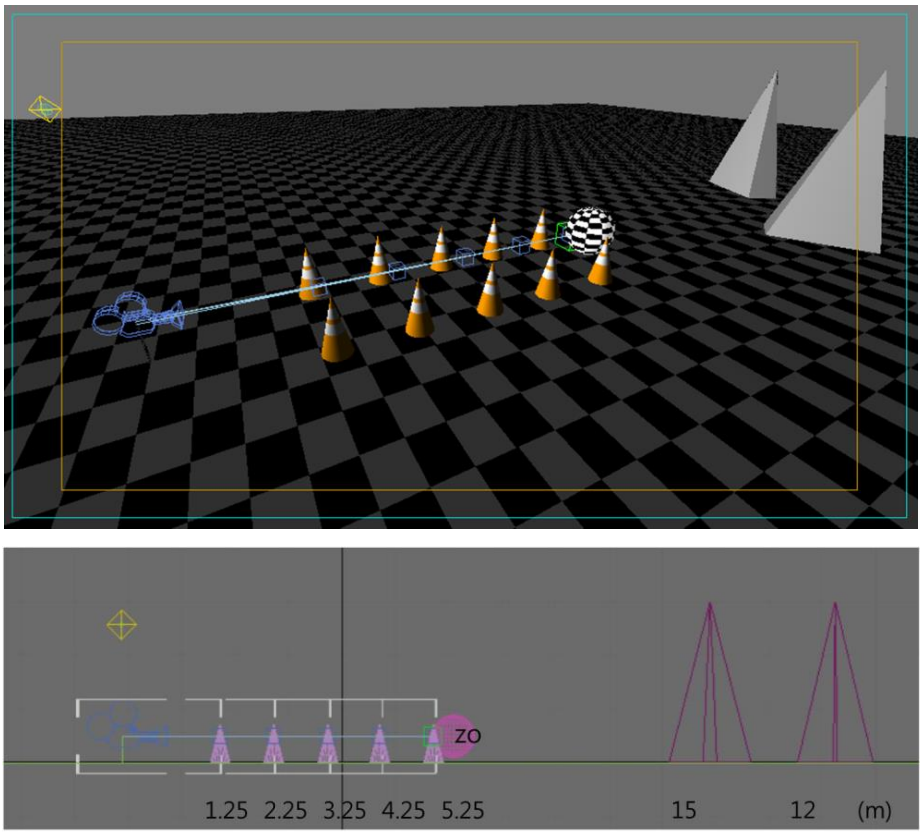


図18 3DCGの実験モデル

3.1 実験環境

(1) 3DCGの環境

カメラは、二つのカメラのレンズの間隔を人の瞳孔の間隔とほぼ同じである 6.5cm に設定する。一般的な三脚を使った水平アングルの高さを基準にし、カメラの高さを 80cm に設定して、それに合わせて被写体を置く。被写体は、モノクロのモザイクボールを使用して、カメラから 5.25m 離れた地点を基準に置くが、1.25m の地点から段階的に移動させて配置し、評価・実験を行う。コンバージェンスポイントの段階的な位置を示すため、オレンジ色の模型を、カメラから 1.25m 離れた地点から 1m 間隔で 5.25m まで配置する。そして背景に 12m と 15m に三角柱をおく。ズームインは、最大にズームアウトした状態の視野角(画角)を 100°、最大にズームインした状態の視野角（画角）を 8°に設定し、10 秒間一定の速度でズームインをする。制作された立体映像はアナグリフ方式を使用して再生する。

(2)　実験の環境

実験室は比較的騒音が少ない 22～24° の温度を維持した密閉された空間であり、ディスプレイは 55 インチ 3DTV(LG TV 55LA6950)を使用する。、赤青メガネを着用して実験を行う。標準視聴距離は画面の高さ(68.5cm)の 3 倍の離れた距離であるため、視聴距離は画面から 205.5cm 離れたところで視聴し、評価を行う（図 19)。

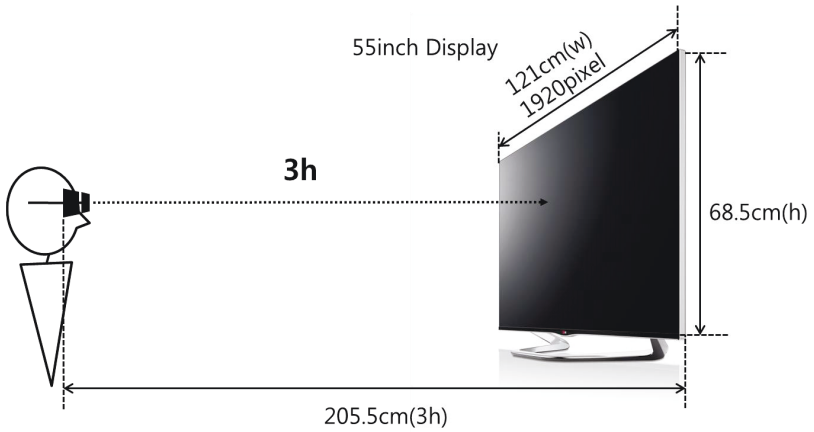


図 19　標準視聴距離

3.2　実験方法

20人の被験者を対象に、コンバージェンスポイントの位置によるズームイン後の立体視の変化を調べるために行う。実験方法は各実験の立体映像を鑑賞した後、アンケートによる主観評価を行う(図20)。

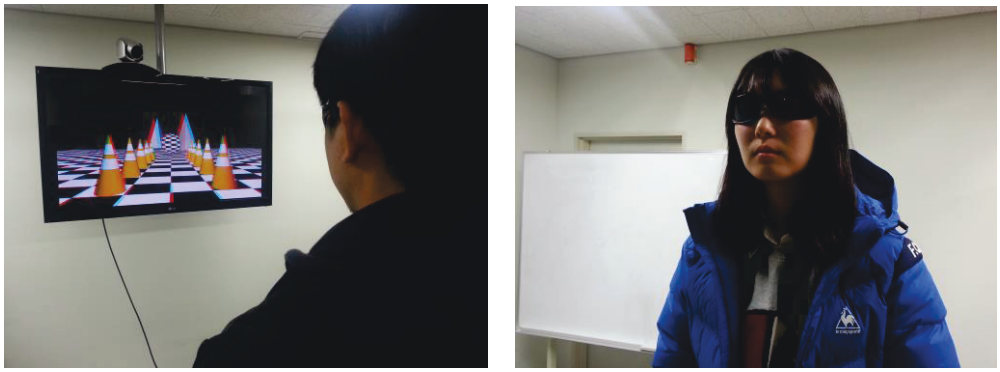


図 20　実験の様子

(1)　実験種類

実験は、コンバージェンスポイントの位置と被写体との位置の変化によって、大きく三つに分けて行う。

まず、最初の実験は、被写体(モノクロのモザイクボール)を5.25mの地点に設置する。コンバージェンスポイントは、各コーンに合わせた1.25mから5.25mまでそれぞれ1mずつ移動した状態で、5回ズームインした映像を制作する。これはコンバージェンスポイントをある位置に固定したままズームインをした場合、どのような結果が出るのかを調べるための実験である。

二つ目の実験は、被写体の位置が5.25mから1.25mまで変化し、コンバージェンスポイントと被写体は同じ位置に設定する。これはズームイン前の被写体と周辺の物体との立体感の変化を見るための実験である。

三つ目の実験は、ズームとともにコンバージェンスポイントを動かす。被写体の位置は5.25mの地点に固定し、ズームインと同時にコンバージェンスポイントを被写体がある5.25mの地点まで移動させる。コンバージェンスポイントの移動幅は1mごとに増やしていく。したがって、ズームイン前のコンバージェンスポイントは5.25mから1.25mまでの5か所に位置することになる。これは、ズームイン前の被写体の立体感とズームイン後の被写体の立体感を比較するための実験である。

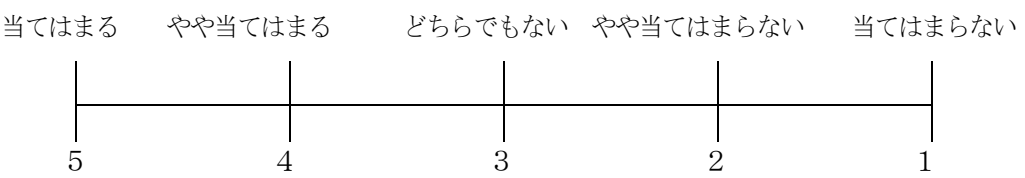
(2) 被験者

被験者は10~20代の男女20人を対象に行った。年齢は19~23歳(平均21.5歳)、男女の比は男子が44.4%で女子が55.6%である。ほとんどの人が3D映画を鑑賞した経験はあるが、3DTVの視聴はほとんど経験がなかった。

(3) アンケート内容

アンケート内容は、視覚的不具合の発生する頻度を見るために集計を行う。立体映像がとても見やすい場合を最高得点の5点とし、そこから一つ下がってゆくたびに4点、3点と得点も下がってゆき、とても見にくいと評価された場合を最低得点の1点とする。

質問：見やすかった（立体視の快適さ）



3.3　実験結果

実験1:　被写体を5.25mに固定し、コンバージェンスポイントは、1.25mから5.25mまで各1mずつ離れたコーンに合わせて移動させ、それぞれの位置でズームインする。

表4　実験1：コンバージェンスポイントの位置によるズームイン前後　（アナグリフによる表示）

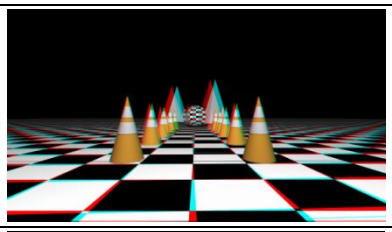
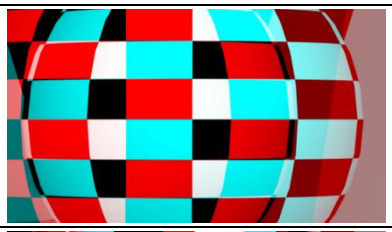
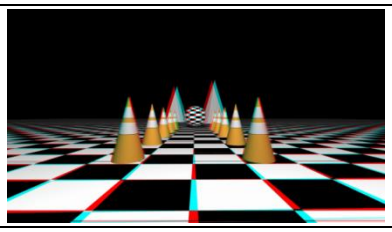
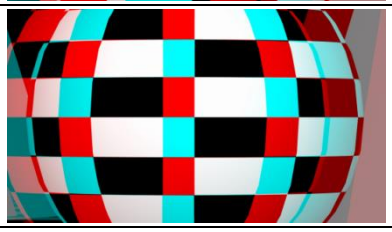
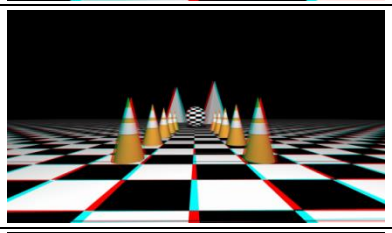
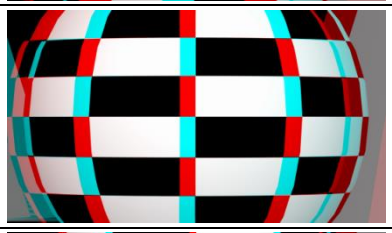
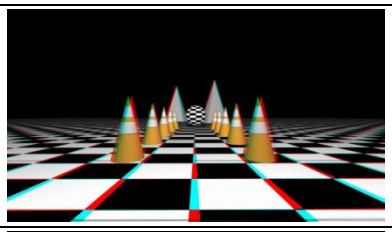
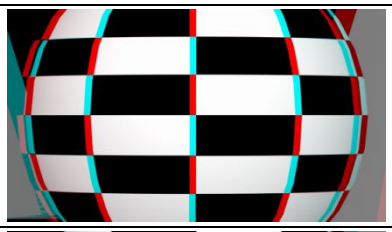
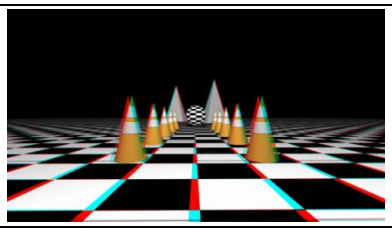
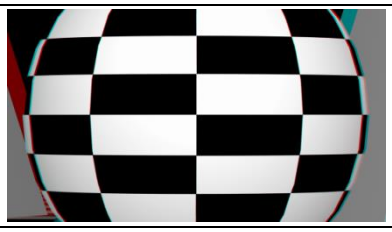
Convergenc point	before Zoom-in	After Zoom-in
1.25m		
2.25m		
3.25m		
4.25m		
5.25m		

表4のように、コンバージェンスポイントの位置が被写体から離れば離れるほど赤と青の差が激しくなり、両眼視差が大きくなることが確認できる。1.25mでは、ズームインする前は安定して見えたが、ズームインと共に両眼視差が大きくなるため、赤と青の差が激しくなることが確認できた。5.25mでは、ズームインする前は逆に1.25mのコーンに赤と青の差がわずかに確認でき、眼鏡を着用すると飛び出しているように見えていた。しかし、ズームインと共に安定して行き、両眼視差がなくなることが確認できた。また、3.25mから1.25mは3Dコンソーシアムの「3DC安全ガイドライン」が勧告している、快適視差範囲内における画面幅に対する奥行き感の比率の最大値である±3%(57ピクセル)を超えていることが、赤と青の差から確認できた。

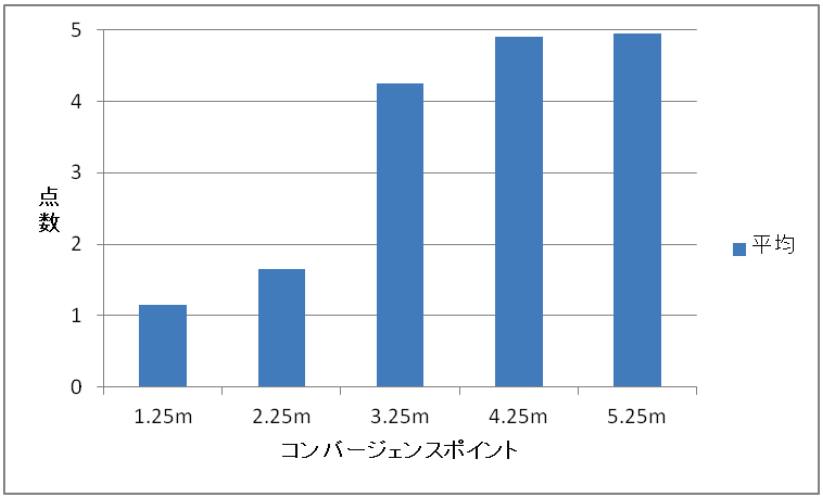


図21　実験1における各位置による見やすさの平均点

実験 1 では被写体ではなく、各コーンに合わせた距離にコンバージェンスポイントを置いた状態でズームインをした場合、図 21 の平均点のグラフが示す通り 2.25m と 1.25m では視覚的不具合が発生することが確認できた。特に 1.25m の場合はズームインする前は非常に快適な立体視ができたが、ズームインとともに過度な両眼視差が発生した。したがって、コンバージェンスポイントが被写体に近く設定されるほど、快適なズーム映像が得られるということが確認できた。

実験2:　コンバージェンスポイントと被写体を同じ位置に同期させ、コンバージェンスポイントと被写体の位置を5.25mから1.25mまで各1mずつそれぞれ段階的に移動させ、ズームインする。

表5　実験2：コンバージェンスポイントの位置によるズームイン前後　（アナグリフによる表示）

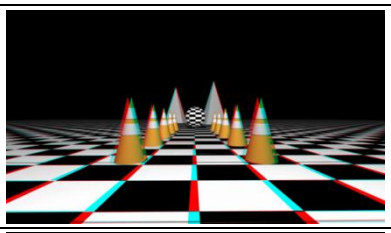
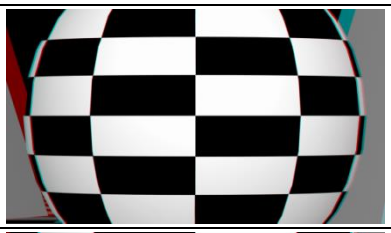
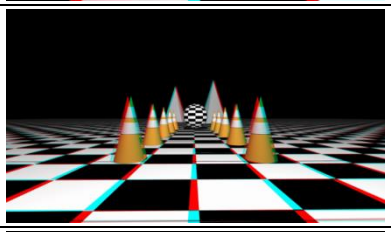
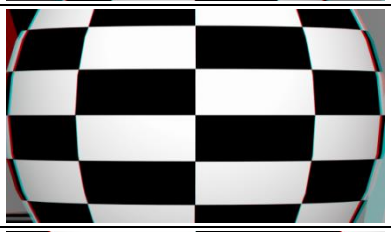
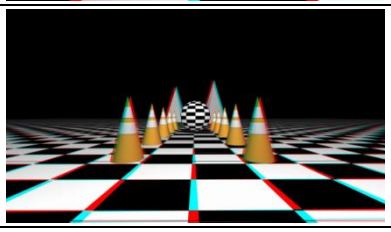
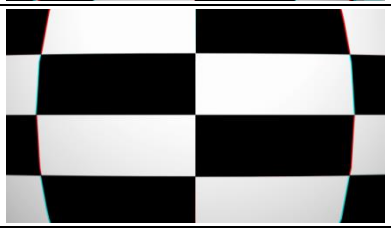
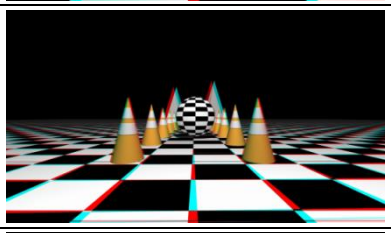
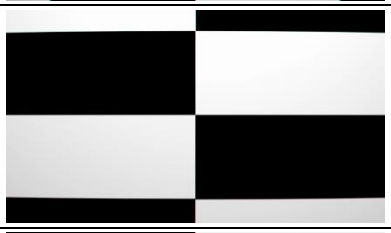
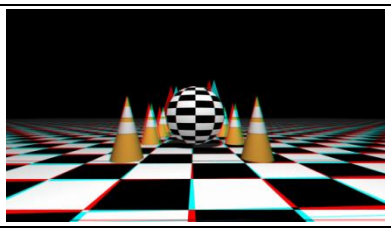
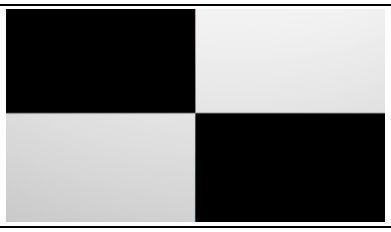
Convergence point	before Zoom-in	after Zoom-in
5.25m		
4.25m		
3.25m		
2.25m		
1.25m		

表5のように被写体にコンバージェンスポイントを合わせると赤と青の差がないことが確認できる。5.25mでは、ズームインする前に1.25mのコーンに赤と青の差が確認でき、コーンが飛び出しているように見えていたが、ズームインと共に

被写体が画面いっぱいになり、両眼視差がなくなることが確認できる。

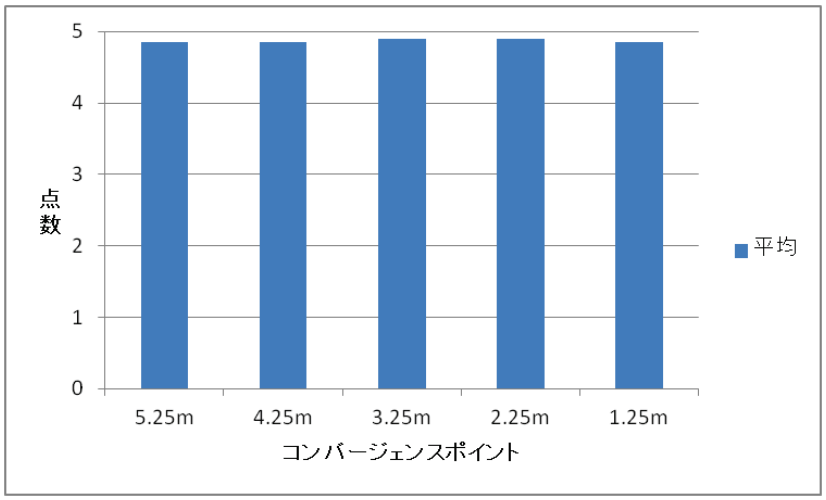


図22　実験2における各位置による見やすさの平均点

実験2では、被写体の位置に合わせてコンバージェンスポイントを設定しズームインをしたことで、図22の平均点のグラフが示す通り、全ての距離において高い点数を得た。よって、ズームイン以降には視覚的不具合は発生しないという結果を確認することができた。

実験3:　被写体を5.25mに固定し、コンバージェンスポイントのスタート位置を5.25mから1.25mまで各1mずつ段階的に離して設定し、ズームインと同時にコンバージェンスポイントもそれぞれ5.25mまで移動する。

表6　実験3：コンバージェンスポイントの移動によるズームイン前後　（アナグリフによる表示）

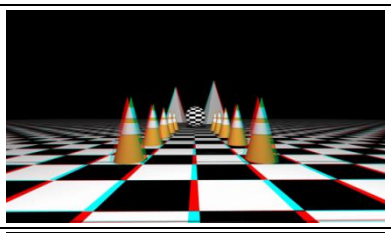
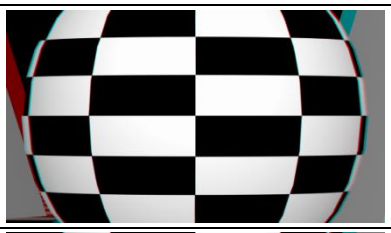
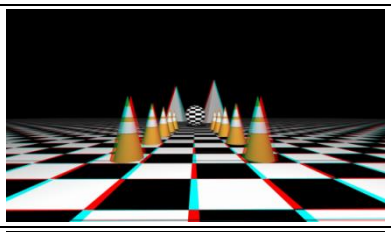
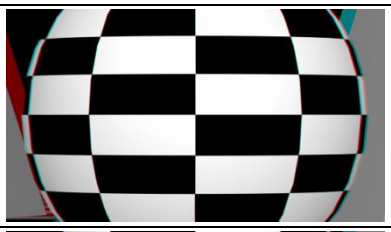
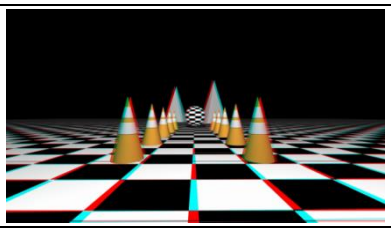
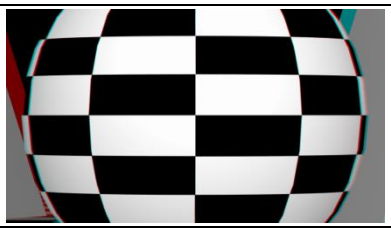
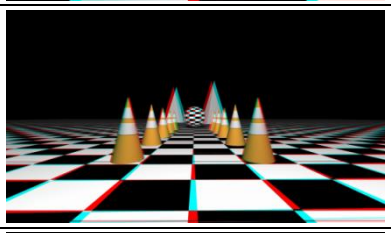
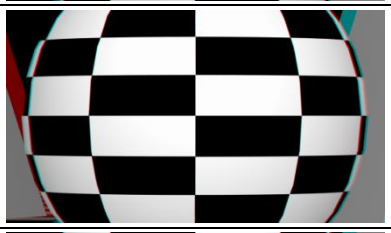
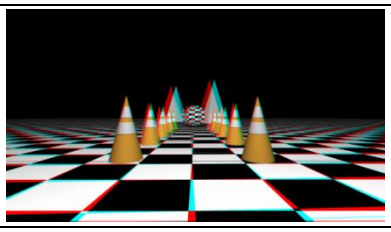
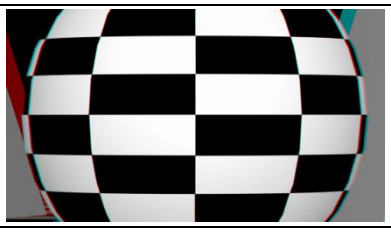
Convergence point	before Zoom-in	after Zoom-in
5.25m →5.25m		
4.25m →5.25m		
3.25m →5.25m		
2.25m →5.25m		
1.25m →5.25m		

表6のようにズームインと共にコンバージェンスポイントが被写体の位置に動くと、全てのケースにおいて両眼視差が発生しない映像を撮影することができた。1.25m→5.25mのように移動幅が大きい場合は、はじめは被写体に赤と青の差が確

認でき、眼鏡を着用すると引っ込んで見えていたが、ズームインと共に両眼視差がなくなり、画面に近付くように見える。

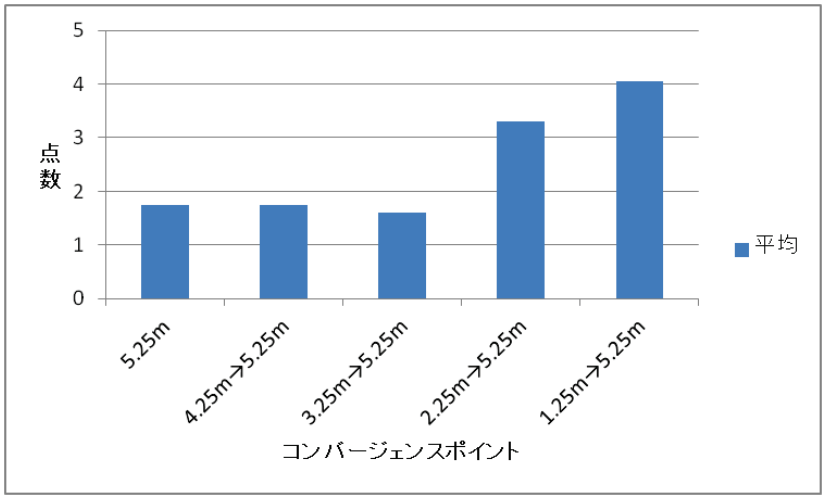


図23　実験3における各位置による見やすさの平均点

実験3は、仮説2を検証するために行った。コンバージェンスポイントを、各コーンと同じ距離に置いた状態からズームインと共に被写体に移動させた。その結果、図23の平均点のグラフが示す通り、ズームと共にコンバージェンスポイントの移動幅が大きい映像ほど高い点数を得ていることが分かる。この実験の結果のから、コンバージェンスポイントの位置を移動させることで快適な立体視を得ることができる、ということが確認できた。しかし、表6の1.25m→5.25mのようにはじめは引っ込んで見えていた被写体が、ズームインとコンバージェンスポイントの移動でスクリーン面に近付いて見えるため、距離感の変動が発生する可能性がある。

4　まとめ

本章では専門家の立体映像撮影方法を通して、一般ユーザーが立体映像を撮影する際に起こりやすい問題点、特にズーム使用に関する問題点を取り上げた。この問題点を検証するため、コンバージェンスポイントの位置によって二つの仮説を立て、3DCG環境による三つの予備実験を行った。一つ目の実験は、被写体を固定し、コンバージェンスポイントを1mずつ離れた位置でズームインをした。　二つ目の実験は、コンバージェンスポイントと被写体を同じ位置に同期させ、1mず

つそれぞれ段階的に移動させ、ズームインをした。三つ目の実験は、被写体を固定し、コンバージェンスポイントのスタート位置を1mずつ段階的に離して設定し、ズームインと同時にコンバージェンスポイントをそれぞれ被写体まで移動させた。この三つの実験の結果から、コンバージェンスポイントが被写体の位置まで移動すると見やすい立体映像を得られることが確認できた。しかし、コンバージェンスポイントの移動幅が大きいと、距離感の変動が発生する可能性があることも確認できた。被写体の立体感を維持するためには、距離感の変動が起こらない範囲内でコンバージェンスポイントを移動させる必要があると考える。そこで２章では、見やすく、距離感の変動が起こらない立体映像撮影のための、コンバージェンスポイント調整技法を提案する。

第 2 章　ズーム時のコンバージェンスポイント調整

前章での予備実験から、ズームを行う際のコンバージェンスポイント位置が立体視の問題を引き起こす要因であると予想された。ズームは一般ユーザーも多用するものであるため、様々なケースを考慮して対策を考えなければならない。

本章では、本研究での最終目標であるズームを使用したコンバージェンスポイント調整のため、ズームイン前のワイドな状態でのフォーカス、被写体及びコンバージェンスポイントのそれぞれの位置に従ったこれらの三つの関係モデルを 9 種類に分類した。そしてこのモデルにコンバージェンスポイントの移動に関する四つの調整技法を提案し、フォーカス、被写体及びコンバージェンスポイントの位置による、距離に関する数式を各技法別に提案する。

1　フォーカスとコンバージェンスポイントの関係モデル

立体映像におけるズームでは、カメラの輻輳とカメラ間の距離(IAD)という要素で2D映像の撮影の場合よりもさらに複雑さが増してくる。この二つの要素と深く関わってくるものがコンバージェンスポイントである。前章で述べたように、コンバージェンスポイントをズームと共に被写体に合わせると、視覚不具合は起こらないということが解った。そこで、多様なコンバージェンスポイントの移動に対応させるためにカメラから被写体までの距離を知る必要がある。

1.1　フォーカス

フォーカスは被写体に焦点を合わせることであり、本研究では、ズームイン被写体をZO(Zoom in Object)、ズームイン前のフォーカスをFb(Focus before Zoom-in)、ズームイン後のフォーカスをFa(Focus after Zoom-in)と表し、その距離を関数d()と定義する。図24にその関係性を示す。

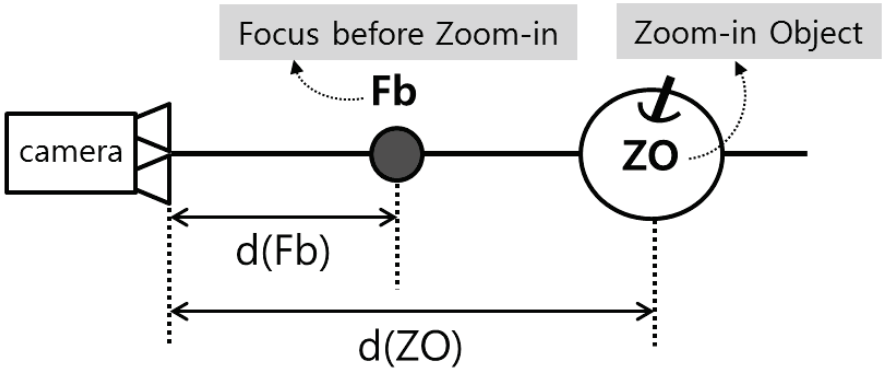
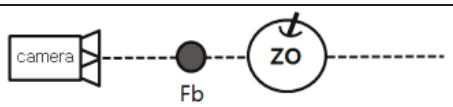
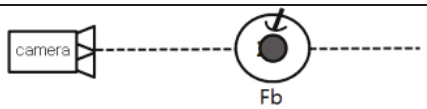
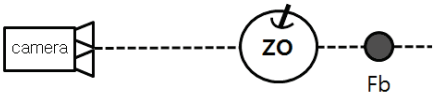


図 24　カメラとフォーカス、被写体との距離

ズームイン前のワイドな画面ではフォーカスがどこに当てられているか一見わからない。映画撮影用の3Dカメラのレンズにはメートルとフィートの数値が表示されているため分かりやすいが、一般ユーザーが使用する民生用の3Dカメラには表示されずわかりにくい。本論文ではズームイン前から考えられる多様なフォーカスの位置を考慮して、専門家ではない一般ユーザーが使用することを前提として、オートフォーカス環境に設定する。したがって、d(Fa)=d(ZO)として扱うことになる。

ZOを基準に、Fbの位置によってFbとZOの関係を表7のように3つのケースに分類した。ただしカメラとの距離をd()と定義する。

表 7　ズームイン前のフォーカスと被写体の関係

ケース	カメラとの距離	側面図
1	*d*(Fb) < *d*(ZO)	
2	*d*(Fb) = *d*(ZO)	
3	*d*(Fb) > *d*(ZO)	

フォーカスの位置がケース1のように被写体より近くの場合、ケース2のように被写体と同じ場合、そしてケース3のように被写体より遠い場合に分類する。オートフォーカスを前提としているのでケース1、2、3全ての場合でズームインととも

にフォーカスは被写体(ZO)へ移動する。

1.2　ズームイン前後のコンバージェンスポイント

ズームイン前のコンバージェンスポイントをCb(Convergence point before Zoom-in)、ズームイン後のコンバージェンスポイントをCaと表記し、図25のように、そのカメラまでの距離は関数d()と定義する。

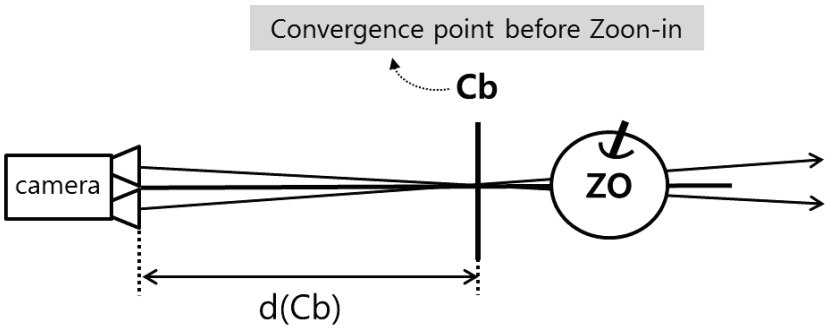


図 25　カメラとコンバージェンスポイントとの距離

カメラと被写体、フォーカス、そしてコンバージェンスポイントを一列の一線上において距離値を測定する理由は、ズームインの前とズームイン後のそれぞれの位置による距離の値を求めてコンバージェンスポイントの調整値を得るためである。カメラと被写体、コンバージェンスポイントを中心に三角関数を利用すれば距離値を得ることが可能である。

図26はこれまで定義した変数、関数をまとめたものである。

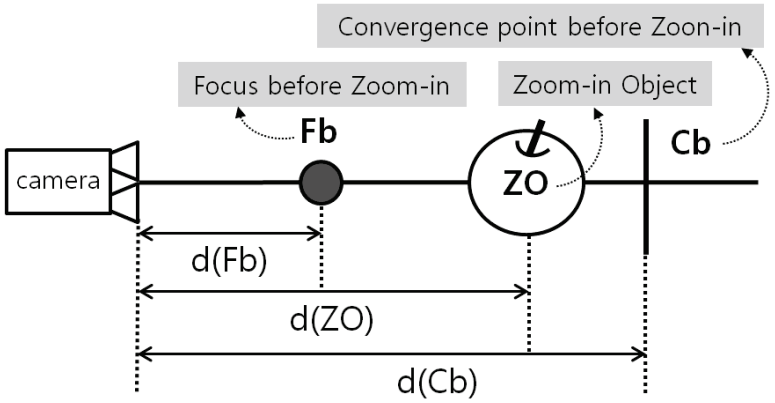


図 26　カメラとの関数の距離

1.3　ズームイン前のフォーカスとコンバージェンスポイントの関係モデル

ズームイン前のフォーカス位置とコンバージェンスポイント位置の関係モデルを作るために、まずズーム前のフォーカス位置で大きく3つに分類した。さらにCbの位置によって3つに分類、計9種に細分化し、フォーカスとコンバージェンスポイントとの関係を定義した。ズームイン前のフォーカス位置とコンバージェンスポイント位置の関係モデルは表8のように表すことができる。

表 8　ズームイン前のフォーカス位置によるコンバージェンスポイント位置の関係モデル

ズームイン前のフォーカス位置	ズームイン前のコンバージェンスポイント位置	ケース
d(Fb) <d(ZO)	d(Cb) <d(Fb)	1
	d(Fb) ≤ d(Cb) ≤ d(ZO)	2
	d(ZO) <d(Cb)	3
d(Fb) = d(ZO)	d(Cb) <d(Fb)	4
	d(Cb) = d(ZO)(d(Cb) = d(Fb))	5
	d(ZO) <d(Cb)	6
d(Fb) >d(ZO)	d(Cb) < d(ZO)	7
	d(ZO)≤ d(Cb) ≤ d(Fb)	8
	d(Fb) <d(Cb)	9

まず、図27のケース1は、Cbがカメラと Fbの間にあるケースである。このケースはコンバージェンスポイントがカメラに近ければ近いほど輻輳角が広くなり、過度な両眼視差が発生する可能性がある。ZOはスクリーン面より引っ込む。

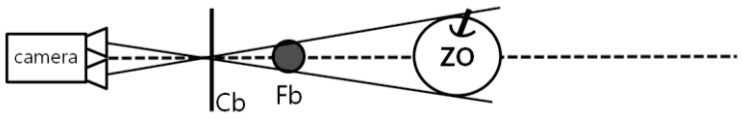
	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(Cb) <d(Fb)
Case1	 *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 27　ケース 1 の側面図

図28のケース2は、CbがFbとZ0の間にある場合である。コンバージェンスポイントが被写体の近くにある為、緩やかな輻輳角を持つ。Z0はスクリーン面から引っ込む。

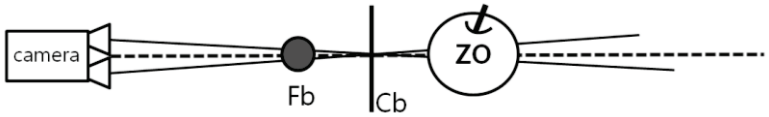
Case2	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(Fb) ≤ d(Cb) ≤ d(ZO)
	 *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 28　ケース 2 の側面図

図29のケース3は、CbがカメラからFbとZ0よりも遠いケースである。コンバージェンスポイントがカメラから遠ければ遠いほど輻輳角は狭くなりZ0はスクリーン面から飛び出す。過度な両眼視差が発生する可能性があり、Z0はスクリーン面より引っ込む。

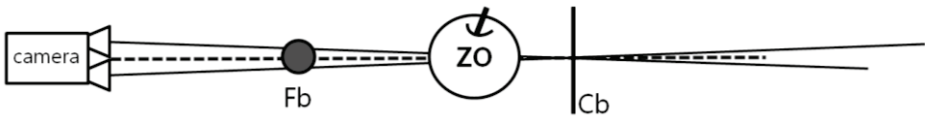
Case3	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(ZO) <d(Cb)
	 *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 29　ケース 3 の側面図

図30のケース4は、CbがカメラとFbの間にあるケースである。コンバージェンスポイントがカメラに近ければ近いほど輻輳角が広くなり、過度な両眼視差が発生する可能性がある。Z0はスクリーン面より引っ込む。

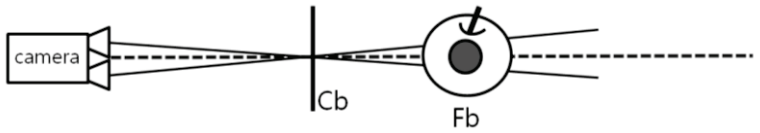
Case4	d(Fb) = d(ZO) ∧ d(Cb) <d(Fb)  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 30　ケース 4 の側面図

図31のケース5は、CbがFbと同じ位置にあるケースである。コンバージェンスポイントが被写体に合って快適な視差が得られ、ZOはスクリーン面に位置する。

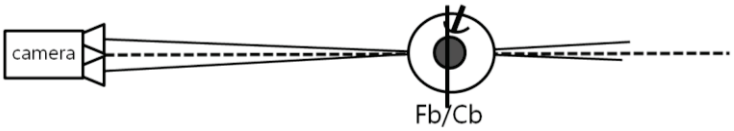
Case5	d(Fb) = d(ZO) ∧ d(Cb) = d(ZO)(d(Cb) = d(Fb))  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 31　ケース 5 の側面図

図32のケース6はFbとZOが同じ位置にあり、CbがFbとZOより遠くにあるケースである。コンバージェンスポイントがカメラから遠ければ遠いほど輻輳角は狭くなり、ZOは飛び出す。

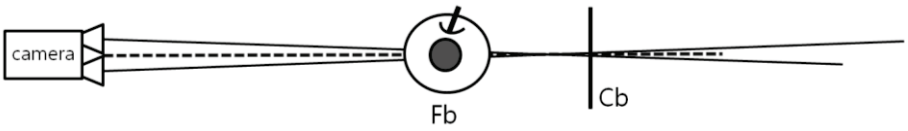
Case6	d(Fb) = d(ZO) ∧ d(ZO) <d(Cb)  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 32　ケース 6 の側面図

図33のケース7は、FbがZOより遠く、CbがZOより近くにあるケースである。コンバージェンスポイントがカメラへ近ければ近いほど輻輳角が広くなり、過度な両

眼視差が発生する可能性がある。Z0はスクリーン面より引っ込む。

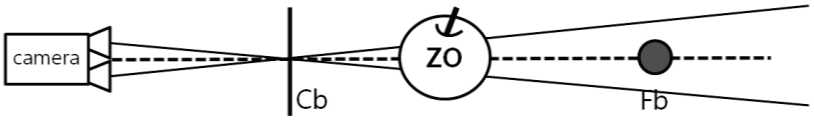
	d(Fb) >d(ZO) ∧ d(Cb) < d(ZO)
Case7	
	*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 33　ケース 7 の側面図

図34のケース8は、CbがZ0とFbと同じかその間にあるケースである。コンバージェンスポイントがカメラから遠ければ遠いほど輻輳角は狭くなり、Z0はスクリーン面から飛び出す。

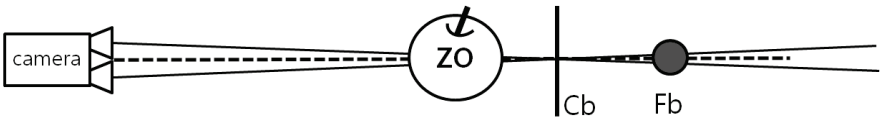
	d(Fb) >d(ZO) ∧ d(ZO)≤ d(Cb) ≤ d(Fb)
Case8	
	*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 34　ケース 8 の側面図

図35のケース9はFbがZ0より遠く、CbがFbより遠くにあるケースである。コンバージェンスポイントがカメラから遠ければ遠いほど輻輳角は狭くなり、Z0はスクリーン面から飛び出す。

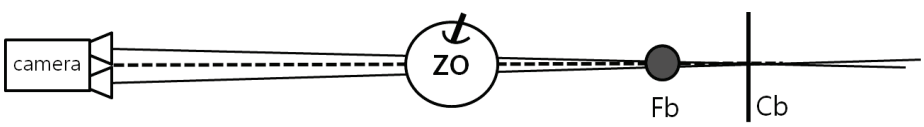
	d(Fb) >d(ZO) ∧ d(Fb) <d(Cb)
Case9	
	*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 35　ケース 9 の側面図

2　コンバージェンスポイント調整技法

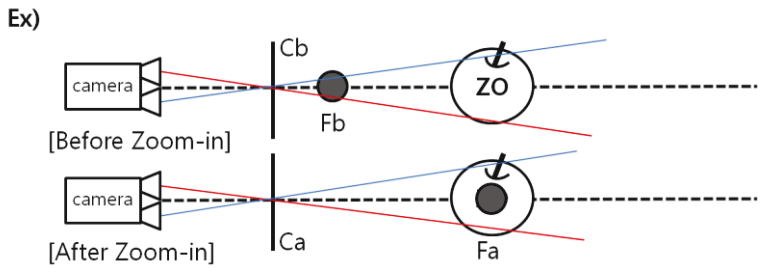
本研究ではズームインによる視覚的不具合と距離感の変動を最小限にするため、コンバージェンスポイントの移動技法を提案する。被写体の位置を中心にフォーカスやコンバージェンスポイントを関数の距離で調整するものである。ここでは、コンバージェンスポイントを固定した固定コンバージェンスポイント技法、フォーカスとコンバージェンスポイントを一致させるフォーカスコンバージェンスポイント一致技法、フォーカスが被写体に動いた距離と同じく連動するフォーカスコンバージェンスポイント連動技法、そして最後に、フォーカスが被写体に動いた距離と同じく連動して動き、快適視差範囲内まで移動する快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法を提案する。提案技法は以下の通りである。

2.1　固定コンバージェンスポイント技法(Fixed Convergence Point Method (FCP 技法))

固定コンバージェンスポイント技法は、コンバージェンスポイントが動かない、すなわちCbがズームイン後にも動かない技法である。最新式の一体型二眼式3Dカメラの原理で、距離値を表すと次の通りである。

$$d(\mathrm{Cb}) = d(\mathrm{Ca}) \qquad (5)$$

この技法は、コンバージェンスポイントとカメラとの距離がズーム前後においても変わらないものである。例えば、図36のようにFbがZOより近くにありCbがFbより近くにある場合、ズームイン前はワイドの状況でZOが引っ込んで見えるが、ズームイン後はそのまま拡大してしまい、過度な両眼視差が発生する可能性がある。



*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Fa: Focus after Zoom in,
Cb: Convergece before Zoom in,　Ca: Convergence after Zoom-in

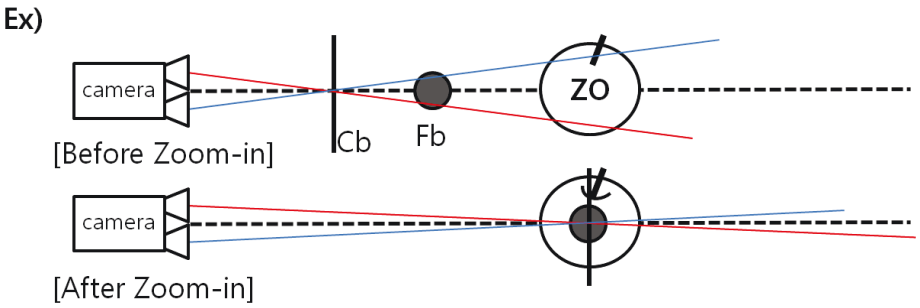
図 36　固定コンバージェンスポイント技法の例

2.2　フォーカスコンバージェンスポイント一致技法(Focus-Convergence Corresponding Method (FCC 技法))

フォーカスコンバージェンスポイント一致技法は、Cbがズームインと同時にフォーカスが合っているZOに移動する技法である。要するにオートフォーカス機能と一緒になって動くというもので、ズームインする途中では操作できない。距離値を表すと次の通りである。

$$d(\mathrm{Ca}) = d(\mathrm{ZO}) \qquad (6)$$

これはコンバージェンスポイントとカメラとの距離が被写体の距離と同じになることを表している。例えば、図37のようにFbがZOより近くにあり、CbがFbより近くにある場合、ズームインと同時にCbとFbがZOに行くことで快適な視差を得られる可能性が高い。



*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Fa: Focus after Zoom in,
Cb: Convergece before Zoom in,　Ca: Convergence after Zoom-in

図 37　フォーカスコンバージェンスポイント一致技法の例

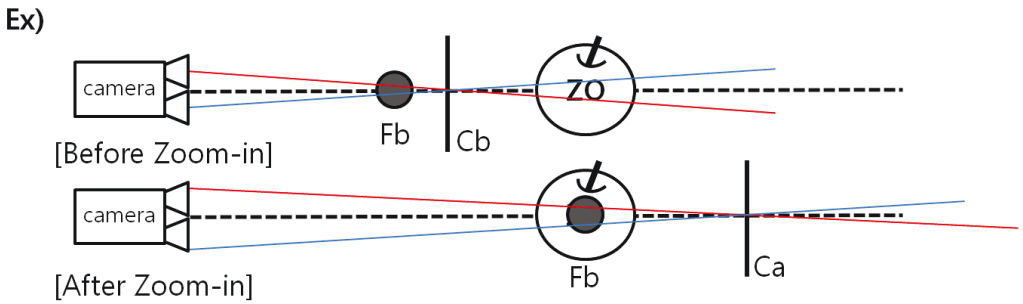
2.3　フォーカスコンバージェンスポイント連動技法　(Coupled Focus-Convergence Method (CFC 技法))

フォーカスコンバージェンスポイント連動技法は、Cbがズームインと共にフォーカスと被写体までの移動距離と同じ程度フォーカス方向に移動する方法である。フォーカスコンバージェンスポイント一致技法のようにオートフォーカス機能と一緒になって動くが、フォーカスが被写体まで移動する距離と同じくコンバージェンスポイントも移動するということである。距離値を表すと次の通りである。

$$d(\mathrm{ZO}) - d(\mathrm{Fb}) = d(\mathrm{Ca}) - d(\mathrm{Cb})$$

$$\therefore d(\mathrm{Ca}) = d(\mathrm{Cb}) + (d(\mathrm{ZO}) - d(\mathrm{Fb})) \qquad (7)$$

すなわち、コンバージェンスポイントの移動距離は、元々のコンバージェンスポイントの距離とズームに起因するフォーカスが移動した距離を合わせた距離である。例えば、図38のようにCbがZOより近くにあり、FbがCbより近くにある場合、ズームインすると、FbからZOまでの距離をCbが動くということである。この場合は、CbがZOを超えてしまい、奥行き感が変わってしまう距離感の変動が発生する可能性がある。



*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Fa: Focus after Zoom in,
Cb: Convergece before Zoom in,　Ca: Convergence after Zoom-in

図 38　フォーカスコンバージェンスポイント連動技法の例

2.4　快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法 (Convergence Comfort Threshold Method (CCT 技法))

快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法は、Cbがズームインと共にフォーカスの移動距離と同じ程度フォーカス方向へ移動するが、それだけではなく快適視差の臨界値範囲内まで移動するという方法である。これは視覚的不具合が発生しないケースと発生するケースとに分けて移動距離を決定する。

$$\boldsymbol{If} \quad d(\mathrm{Cb}) + \big(d(\mathrm{ZO}) - d(\mathrm{Fb})\big) \le |d(\theta)|$$
$$\boldsymbol{then} \quad d(Ca) = d(Cb) + \big(d(ZO) - d(Fb)\big),$$
$$\boldsymbol{If} \quad d(\mathrm{Cb}) + \big(d(\mathrm{ZO}) - d(\mathrm{Fb})\big) > |d(\theta)|$$

$$\boldsymbol{then} \quad d(Ca) = d(\theta) \tag{8}$$

（d（θ）：視覚的不具合を発生させない最大距離）

フォーカスコンバージェンスポイント連動技法でのCa距離がθの絶対値より小さい、もしくは同じであるなら、Caはフォーカスコンバージェンスポイント連動技法と同じであり、フォーカスコンバージェンスポイント連動技法でのCa距離がθの絶対値より大きいなら、Caとθの距離が同じということになる（図39）。

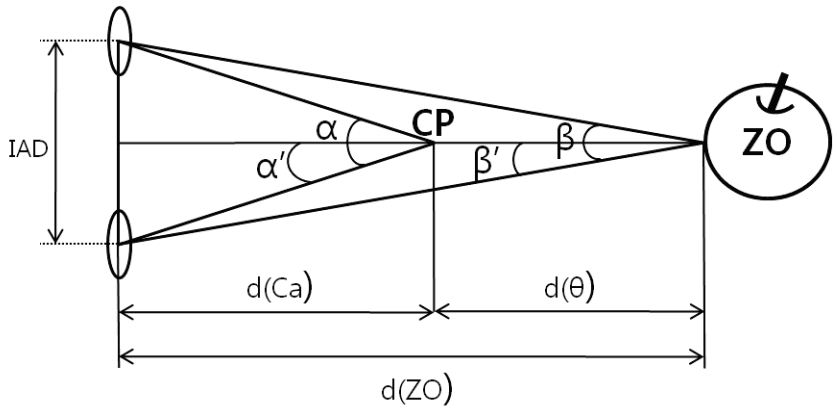


図 39　d（θ）の距離値

ここでd（θ）を定義すると、以下のようになる。

$$|\alpha - \beta| = 1\,°$$

$$|\alpha' - \beta'| = 0.5°$$

$$\tan\beta' = \frac{\mathrm{IAD}}{2} / \mathrm{d(ZO)}$$

$$\beta' = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{IAD}}{2\mathrm{d(ZO)}}\right)\mathrm{rad}$$

$$0.5° = 0.008722\ \mathrm{rad}$$

$$\alpha' = \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{IAD}}{2\mathrm{d(ZO)}}\right) + 0.008722\ \mathrm{rad}$$

$$\tan\alpha' = \frac{\mathrm{IAD}}{2} / \mathrm{d(Ca)}$$

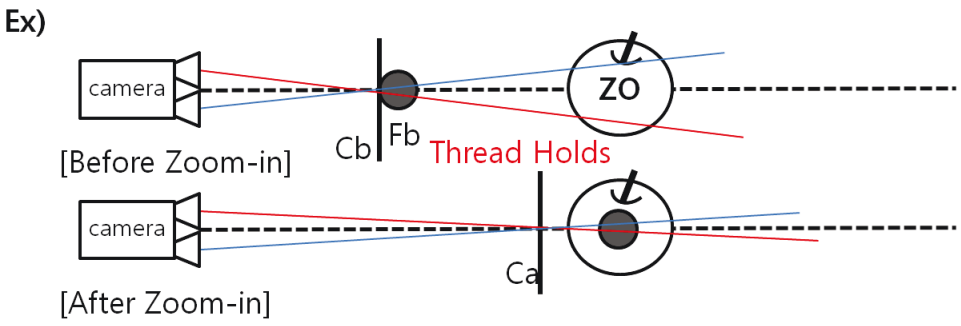
$$\mathrm{d(Ca)} = \frac{\mathrm{IAD}}{2} / \tan\alpha'$$

$$= \frac{\mathrm{IAD}}{2(\tan(\tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{IAD}}{2\mathrm{d(ZO)}}\right) + 0.008722))}$$

$$\mathrm{d}(\theta) = |\mathrm{d(ZO)} - \mathrm{d(Ca)}|$$

$$= \left|\mathrm{d(ZO)} - \frac{\mathrm{IAD}}{2\times\tan(\tan^{-1}(\frac{\mathrm{IAD}}{2\times\mathrm{d(ZO)}}))+0.008722}\right| \qquad (9)$$

例えば、図40のようにFbがZOより近くにあり、CbがFbより近くにある場合、ズームインと共にZOに向かうが、ズームイン前の奥行き感を保ちながら快適な視差範囲まで動くということである。



*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Fa: Focus after Zoom in,
Cb: Convergece before Zoom in,　Ca: Convergence after Zoom-in

図 40　快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法の例

3　まとめ

本章ではズーム時のコンバージェンスポイントを調整するため、ズームイン前のフォーカス、被写体及びコンバージェンスポイントの位置に従ったモデルを 9

ケース提示した。また、前章の予備実験で立証した視覚的不具合や距離感の変動を防ぐため、コンバージェンスポイント移動値をカメラからの距離値の数式で表した。そのうえでフォーカス、被写体との距離でコンバージェンスポイントの移動調整技法を提案し、四つのコンバージェンスポイント移動技法を提案した。この技法を次章に取り上げて実写で撮影し、両眼視差を基準にした性能評価を行っい、結果が最も良い技法を選定していく。

第 3 章　実写撮影映像による性能評価

本章では、前章で提示した四つのコンバージェンスポイント移動技法の優位性を比較するため、ケース別に四つの技法を適用しながら実写での撮影を行う。

撮影に使用するカメラは一体型二眼式３DカメラであるSONY社のPMW-TD300を使い、撮影した立体映像の両眼視差の分析の為、SONY社の3DBOXを利用する。各映像のズームイン前の両眼視差データとズームイン後の両眼視差データを比較し、両眼視差の数値を求める。その数値を3DC安全ガイドラインで勧告している範囲を基準にして、各技法の優位性の検証を行う。

1　実写による提案技法の検証

本章では第 2 章で提案した技法を検証する。そのために、実写の立体映像の撮影を行って 3D BOX で両眼視差のデータを集計する。

9種のケース別に4種の距離を適応した評価モデルは36種になる。そこで4種のコンバージェンスポイント移動技法を使用し、約20秒程度のズームインを行う。SONY 3D BOX(MPE-200, MPES-3D01)を用いてズームイン前とズームイン後の両眼視差の変化を数値で分析を行う。以下、実験のフロー図を図41に示す。

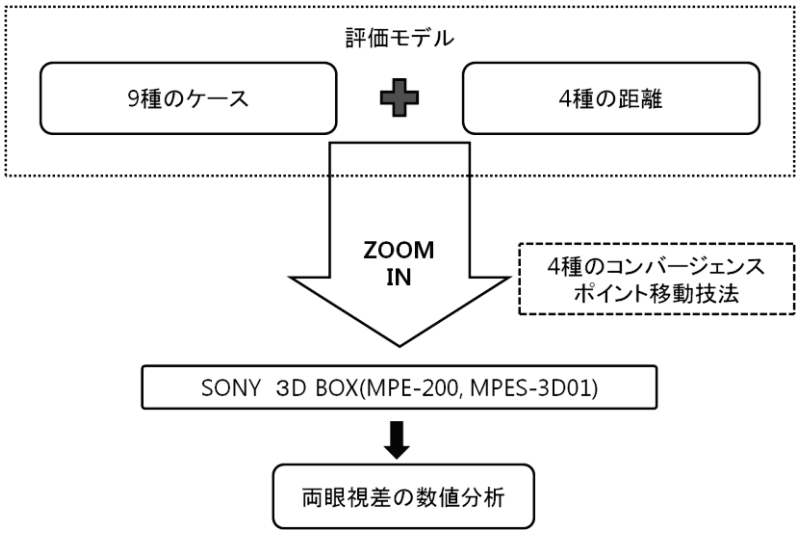


図 41　実写撮影の技術概要図

本研究は、一体型二眼式3Dカメラのズーム時に発生し得る違和感や視覚的不具合を防止するため、ズーム使用によるコンバージェンスポイントの移動調整技法を提案することである。これに向けた研究仮説として、第一章において次の２つの仮説を提示した。一つ目は、「オートフォーカスと同じ距離値でズームインと同時に被写体にコンバージェンスポイントを合わせると、視覚的不具合がない快適な映像を得ることができる。」という説で、二つ目は「被写体にコンバージェンスポイントを合わせると被写体がスクリーン面になるが、ズームイン前の被写体の奥行き感（飛び出しや引っ込み）を維持すれば違和感が発生しない。」という説である。

この2つの仮説を検証するため、前章で提示したズームイン前のフォーカスとコンバージェンスポイントの関係モデルに4つの技法を適用して撮影を行う。

1.1　検証用立体映像撮影

検証用の立体映像を撮影するにあたって使用するカメラをどれにするのか、また、どのように撮影をするのかということについて検討を行った。序論でも述べたように、一体型二眼式3Dカメラの種類は少ないので、その中でもコンバージェンスポイントのリングがあり、手回しで正確に調整できるSONY社の3Dカメラ、PMW-TD300を使用した（図42）。コンバージェンスポイントリングを調整することで二眼のレンズの輻輳が変化するため、コンバージェンスポイントを自由に設定することができ、さまざまな立体感の表現が可能である。

図 42　SONY 二眼式一体型３D カメラ「PMW-TD300」

1.2　撮影環境

一定の撮影条件で実際に撮影を行った。撮影した環境は以下のようなものである。

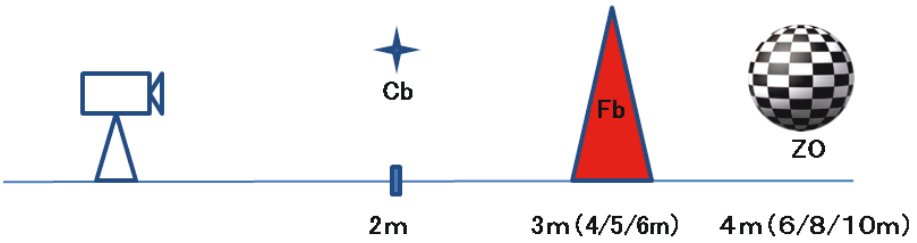


図 43　撮影環境略図

まず、図43のようにカメラから2m離れた所からFb、ZO、Cbを9種のケースに細分化したモデルを1m、2m、3m、4m間隔に配置する。

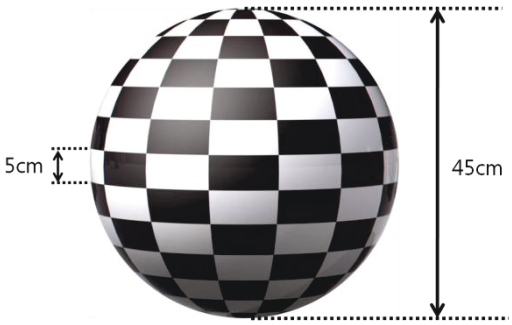


図 44　被写体(ZO)のモノクロのモザイクボール

被写体(ZO)は両眼視差の差を確認しやすくするため、図44のようなモノクロのモザイクボールを用いる。

図 45　撮影環境の実際の写真

図 46　実際映像の例の写真

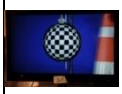
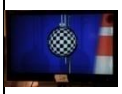
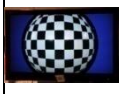
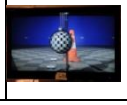
またズームイン前のフォーカス(Fb)は、オレンジ色のコーンを使って合わせる。実際の撮影環境の様子は図45、図46のとおりである。

1.3　撮影方法

第2章で提示したモデルのケースと提案したコンバージェンスポイント移動技法を適用して撮影を行う。ケース当たりに四つの技法と四つの距離で16回の撮影を行い、9ケース全部で144回の撮影を行う。オートフォーカス前提で、被写体まで約20秒間ズームインしながら撮影する。この時のレンズの焦点距離は40から280㎜まで、7倍に拡大する。

表9は、ケースと距離によるズームイン前と後の映像を表したものである。

表 9　ケースと距離によるズームインの映像

Case	1m		2m		3m		4m	
	before	after	before	after	before	after	before	after
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

2　実写性能評価

2.1　評価機器

撮影した映像からSONY 3D BOX(MPE-200、MPES-3D01)を使い、画面の中の近い所と遠い所の両眼視差データを集計する。

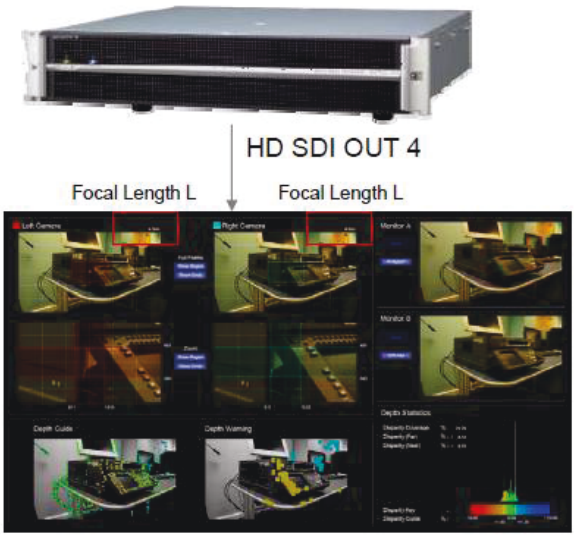


図 47　SONY MPES-3D01

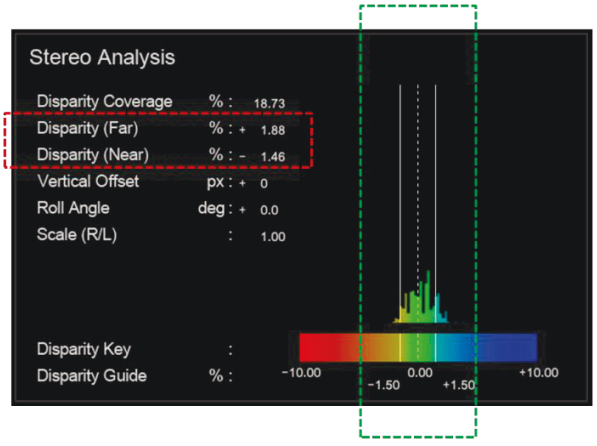


図 48　MPES-3D01 のステレオアナリシス例

図47はSONY MPES-3D01のステレオアナリシスによる立体分析値で、図48の赤い点線の中にあるのは画面の中にある被写体の近い所と遠い所の視差を表したものである。緑点線のデップスーバジェット(Depth Budget)は奥行き感の範囲を表す数値である。これは0から±10%まで設定できるが、3Dコンソーシアムの「3DC安全

ガイドライン」が勧告している、快適視差範囲内における画面幅に対する奥行き感の比率の最大値である±3%に設定した。今回の実験ではズームインによって被写体の近い所と遠い所のそれぞれの視差が±3%以上になることを視覚的不具合が発生すると定義する。デップスーバジェットにはプラス、0、マイナスが存在し、0がスクリーン面を表している。表7～表15中のFarの値がプラス、すなわち正の視差を表し、Nearの値がマイナス、すなわち負の視差を表す。また、デップスーバジェットがプラスから0やマイナス、又はマイナスから0やプラスに変わることを距離感の変動とする。

2.2　評価方法

ケースごとに四つの技法と四つの距離で計16回の撮影を行う。よって、9ケース全部で144回の撮影を行う。撮影した144個の映像の、ズームインする前と後の両眼視差データを記録し、グラフに整理する。グラフには、快適視差範囲と距離感の変動の発生領域を表示する。グラフに分類された値を使用して、各技法の視覚的な不具合や距離感の変動の発生率を分析する。

3　実験結果及び分析

以下のケース別示した表は、撮影結果を表したものであり、各段階の上の写真は実写で撮影したもので、下は実写のステレオアナリシスを表すものである。ケース別に4つの技法を1、2、3、4m間隔で撮影し、±3%を超える場合は視覚的不具合が発生するということで赤い色で表す。また、デップスーバジェットが変わり距離感の変動が発生した時には黄色で表し、視覚的不具合と距離感の変動が同時に発生した時には紫色で表す。

（1）　ケース1（d(Fb)<d(Z0)∧d(Cb)<d(Fb)）

ケース１(図49)ではFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)において全ての距離で視覚的不具合が発生し、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）において全ての距離で距離感の変動が発生した。CFC技法（フォーカスコンバージェンスポイント連動技法）とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージ

ェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった（表10)。

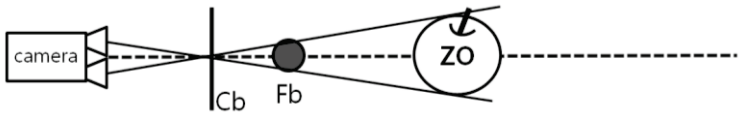
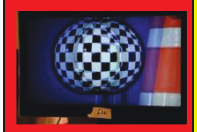
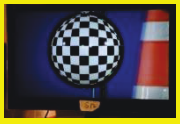
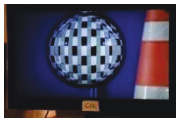
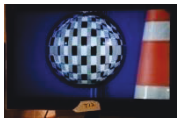
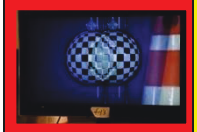
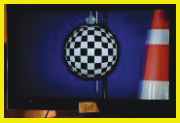
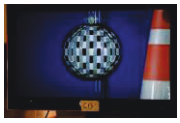
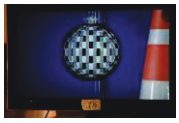
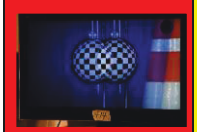
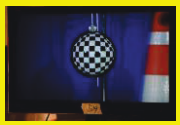
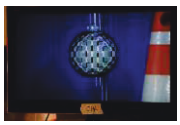
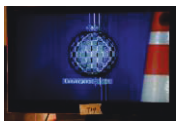
Case1	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(Cb) <d(Fb)  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 49　ケース 1 の側面図

表 10　ケース 1 の撮影結果の比較表

Case 1		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +1.88	Far: +7.92 Near: +7.50	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: +2.71 Near: +2.29	Far: +2.71 Near: +2.29
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +2.29	Far: +9.79 Near: -3.96	Far: +0.00 Near: -0.29	Far: +2.92 Near: +0.00	Far: +2.71 Near: -0.21
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +2.29	Far: +9.79 Near: -0.21	Far: +0.00 Near: -2.50	Far: +2.50 Near: -0.21	Far: +2.92 Near: -0.42
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +2.29	Far: +9.79 Near: -0.21	Far: +0.00 Near: -2.29	Far: +2.71 Near: +0.42	Far: +3.13 Near: +0.83

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース1は、ズームイン前のフォーカスが被写体より近くにあり、それよりもズームイン前のコンバージェンスポイントが近くにある場合である。図50のFCP技法による結果は快適視差範囲の±3%を越え、視覚的不具合が発生したことが分かる。またズームイン前の被写体は奥行きに位置し、ズーム後にも奥行き(プラス:+)の領域に位置すべきだが、マイナスに位置すると飛び出しになって距離感の変動が発生する。ケース1では、FCP技法とFCC技法において距離感の変動が発生したことが分かる。

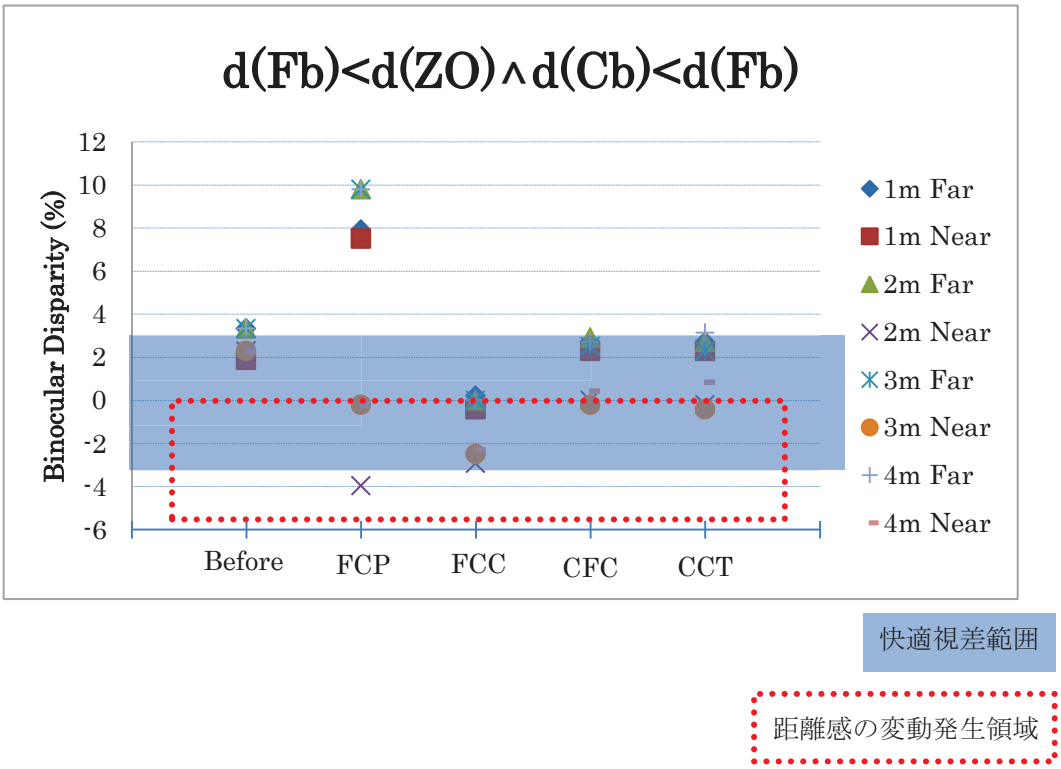


図 50　ケース 1 の両眼視差値結果

(2)　ケース2(d (Fb)<d(ZO) ∧d(Fb)≤d(Cb)≤d(ZO))

図51のケース2ではFCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において全ての距離で距離感の変動が発生した。FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった。(表11)。

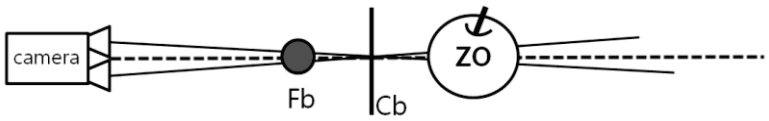
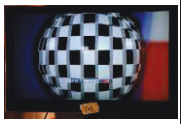
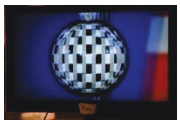
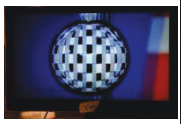
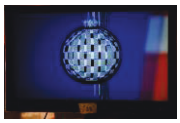
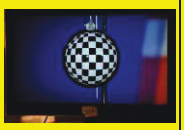
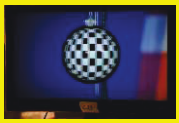
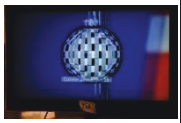
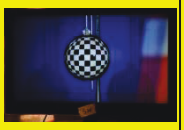
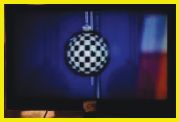
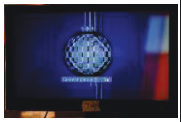
Case2	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(Fb) ≤ d(Cb) ≤ d(ZO)
	 *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 51　ケース 2 の側面図

表 11　ケース 2 の撮影結果の比較表

Case 2		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.50 Near: +0.21	Far: +3.54 Near: +3.13	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: -2.08 Near: -2.50	Far: +2.50 Near: +2.08
2m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.08 Near: -0.21	Far: +2.71 Near: +2.50	Far: +0.21 Near: +0.00	Far: -1.88 Near: -2.29	Far: +2.50 Near: +2.29
3m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.67 Near: -0.63	Far: +2.92 Near: +2.71	Far: +0.00 Near: -0.21	Far: -1.46 Near: -1.67	Far: +2.50 Near: +2.29
4m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.46 Near: -0.63	Far: +2.50 Near: +2.29	Far: -2.21 Near: -2.21	Far: -1.04 Near: -1.04	Far: +3.12 Near: +2.92

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース2では、4つの技法全てが快適視差範囲内にあるので視覚的不具合が起こ

らない。CFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図52)。

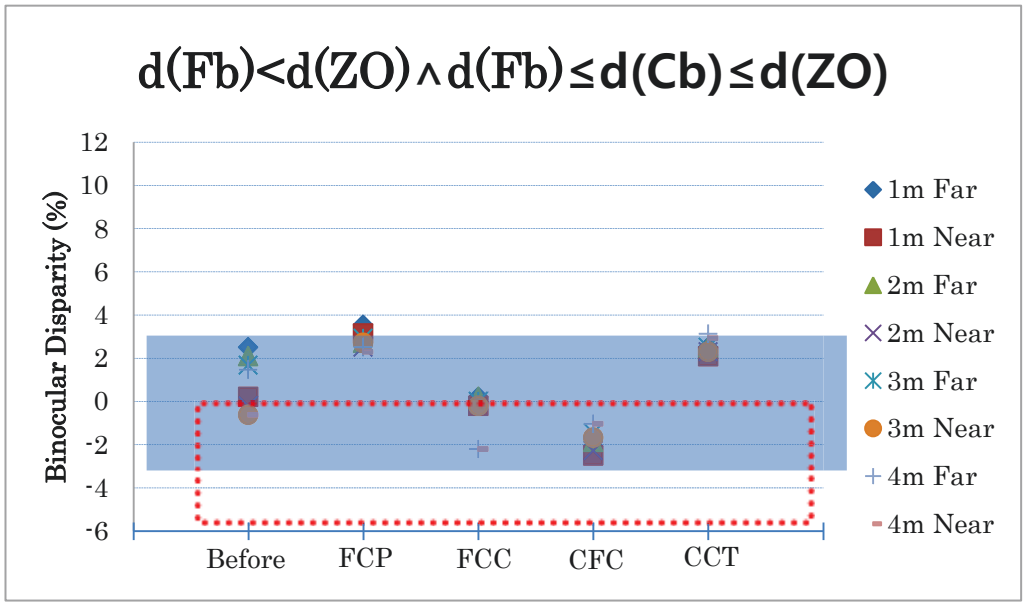


図 52　ケース 2 の両眼視差値結果

(3)　ケース3(d (Fb)<d(ZO) ∧d(Cb)>d(ZO))

図53のケース3ではCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において全ての距離で視覚的不具合が発生し、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）の2mから4mでは距離感の変動のみ、1mでは視覚的不具合と距離感の変動両方が発生した。FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった（表12)。

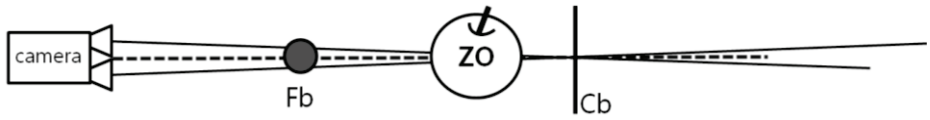
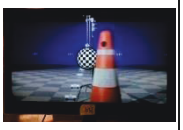
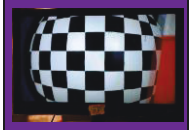
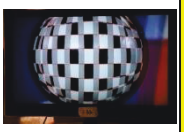
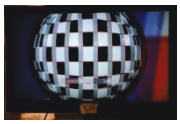
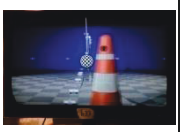
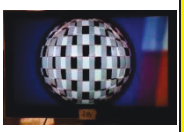
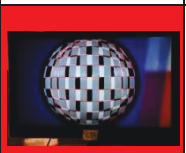
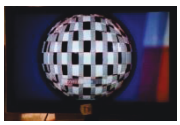
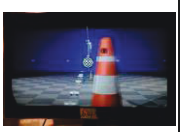
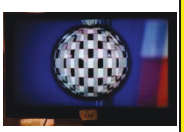
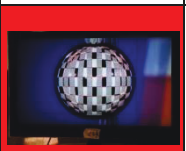
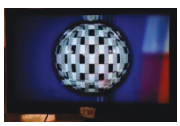
Case3	d(Fb) <d(ZO) ∧ d(ZO) <d(Cb)  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 53　ケース 3 の側面図

表 12　ケース 3 の撮影結果の比較表

Case 3		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.88 Near: -0.42	Far: -3.33 Near: -7.29	Far: +0.21 Near: -3.96	Far: -5.63 Near: -6.46	Far: -2.50 Near: -3.13
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.25 Near: -0.83	Far: -3.33 Near: -3.96	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: -4.79 Near: -5.21	Far: -2.71 Near: -3.13
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.25 Near: -1.04	Far: -3.33 Near: -3.75	Far: +0.21 Near: +0.00	Far: -4.38 Near: -4.79	Far: -2.92 Near:-3.33
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.04 Near: -1.04	Far: -2.71 Near: -3.13	Far: +0.21 Near: +0.00	Far: -3.54 Near: -3.75	Far: -2.71 Near: -2.92

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース3では、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）とCFC技法（フォーカスコンバージェンスポイント連動技法）で視覚的不具合が発生したことが分かる。またケース3は、ズームイン前の被写体は飛び出しに位置し、ズーム後にも飛び出し（マイナス：－）の領域に位置すべきだがゼロ点に位置し、スクリーン面になって距離感の変動が発生する。ケース3では、FCC技法で距離感の変動が発生したことが分かる（図54）。

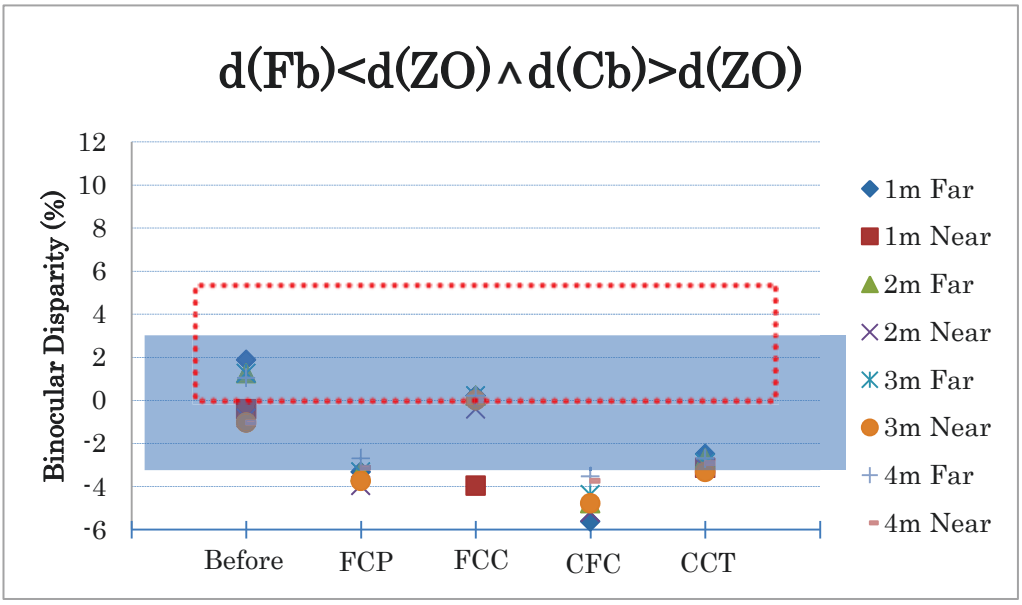


図 54　ケース 3 の両眼視差値結果

(4)　ケース4（d(Fb)=d(ZO) ∧d(Cb)<d(Fb)）

図55のケース4ではFCP技法（固定コンバージェンスポイント技法）とCFC技法の1、2、4mで視覚的不具合が発生し、3mでは視覚的不具合と距離感の変動両方が発生した。FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）は全ての距離で距離感の変動が発生。CCT技法（快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法）では何も問題が発生しなかった（表13）。

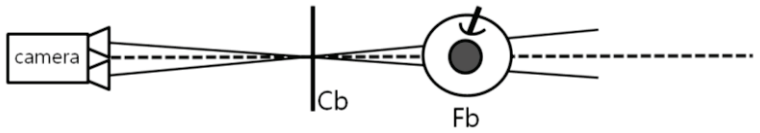
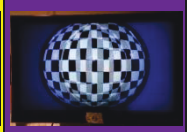
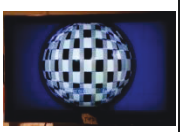
Case4	d(Fb) = d(ZO) ∧ d(Cb) <d(Fb)  *ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 55　ケース 4 の側面図

表 13　ケース 4 の撮影結果の比較表

Case 4		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.92 Near: +1.88	Far: +6.46 Near: +5.83	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: +6.67 Near:+6.04	Far: +3.13 Near: +2.50
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.54 Near: +2.29	Far: +9.38 Near: +8.96	Far: +0.42 Near: +0.00	Far: +8.96 Near: +8.54	Far: +3.33 Near: +2.92
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.54 Near: +2.50	Far: +9.79 Near: -4.38	Far: +0.42 Near: +0.00	Far: +9.79 Near: -4.38	Far: +2.92 Near: +2.50
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +2.29	Far: +9.79 Near: +0.83	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +9.79 Near: +0.83	Far: +2.71 Near: +2.50

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース4では、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において視覚的不具合が発生したことが分かる。FCP技法やCFC技法のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図56)。

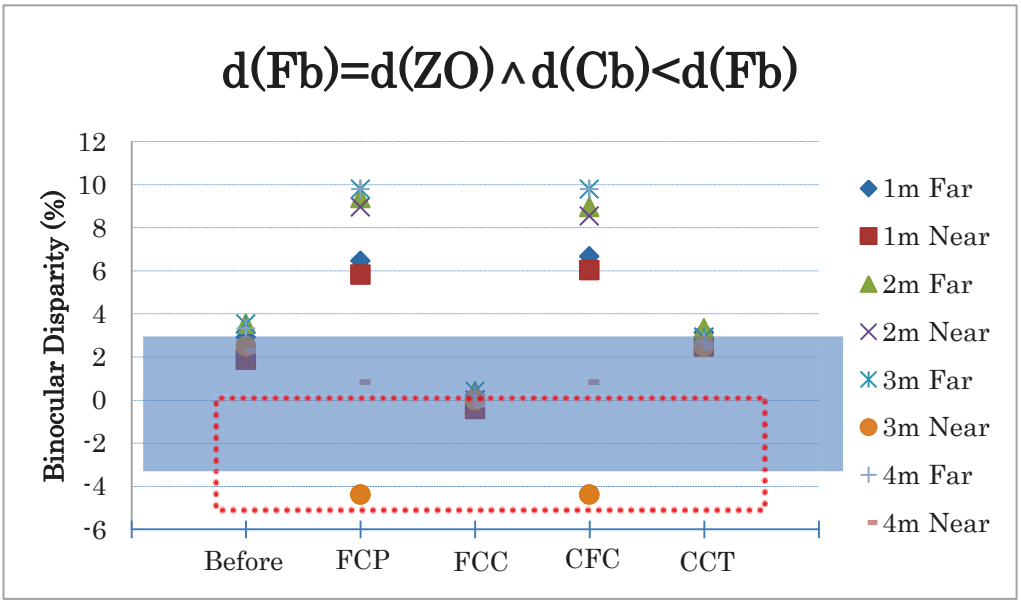


図 56　ケース 4 の両眼視差値結果

(5)　ケース5 (d (Fb) =d (ZO) ∧d (Cb) =d (ZO) (d (Cb) =d (Fb)))

図57のケース5では、どの場合でも問題は発生しなかった（表14)。

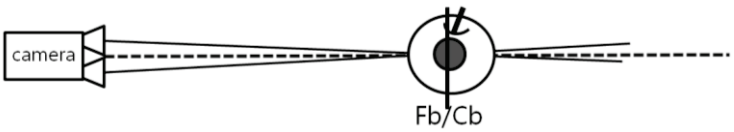
Case5	d(Fb) = d(ZO) ∧ d(Cb) = d(ZO)(d(Cb) = d(Fb))
	
	*ZO: Zoom In Object, Fb: Focus before Zoom in, Cb: Convergnece before Zoom in

図 57　ケース 5 の側面図

表 14　ケース 5 の撮影結果の比較表

Case 5		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.50 Near: +1.04	Far: +0.83 Near: +0.00	Far: +0.83 Near: +0.00	Far: +0.83 Near: +0.00	Far: +0.83 Near: +0.00
2m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.08 Near: +0.63	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21
3m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.88 Near: +0.00	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21
4m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.67 Near: +0.63	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: +0.21 Near: -0.21

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース5では、4つの技法全てにおいて±2%に位置し、視覚的不具合が発生しない。さらに全てがスクリーン面から動かずに位置したので、距離感の変動も発生しないことが見て取れる（図58)。

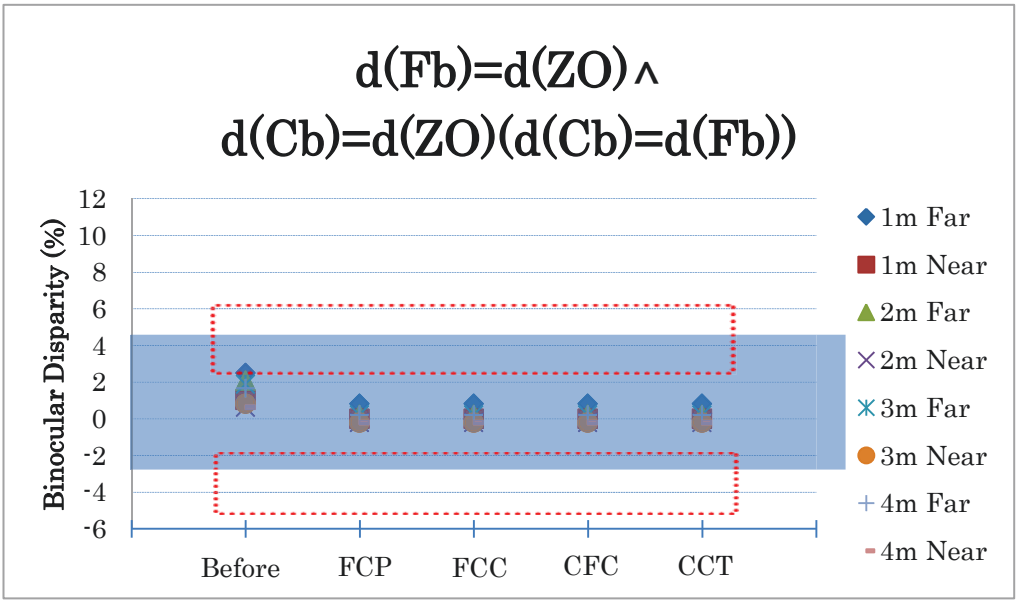


図 58　ケース 5 の両眼視差値結果

(6)　ケース6 (d (Fb) =d (ZO) ∧d (Cb) >d (ZO))

図59のケース6ではFCP技法 (固定コンバージェンスポイント技法) とCFC技法において全ての距離で視覚的不具合が発生し、FCC技法 (フォーカスコンバージェンスポイント一致技法) において全ての距離で距離感の変動が発生した。CCT技法 (快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法) では何も問題が発生しなかった (表15)。

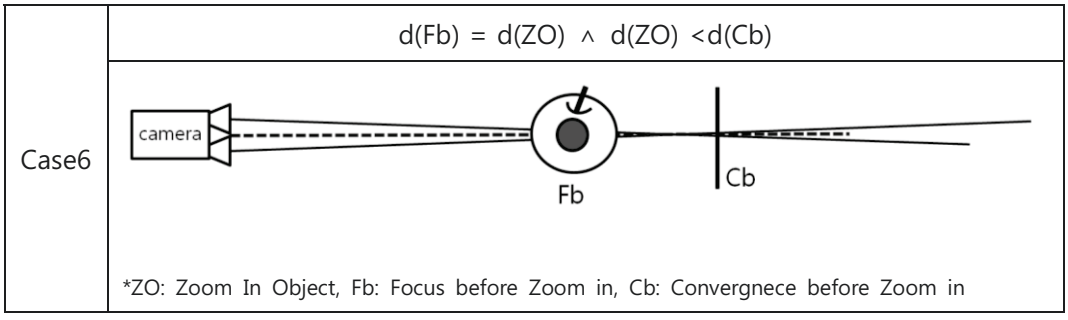


図 59　ケース 6 の側面図

表 15　ケース 6 の撮影結果の比較表

Case 6		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.50 Near: +0.21	Far: -5.83 Near: -6.67	Far: +0.63 Near: -0.21	Far: -4.79 Near: -5.83	Far: -2.08 Near: -2.92
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.46 Near: +0.42	Far: -4.79 Near: -5.42	Far: +0.42 Near: -0.42	Far: -4.58 Near: -5.42	Far: +2.50 Near: +3.13
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.46 Near: +0.00	Far: -4.17 Near: -4.58	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: -4.17 Near: -4.58	Far: -2.71 Near: -3.13
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.25 Near: +0.21	Far: -3.54 Near: -3.96	Far: +0.21 Near: -0.21	Far: -3.54 Near: -3.96	Far: -2.50 Near:-2.92

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース6では、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において視覚的不具合が発生したことが分かる。FCP技法やCFC技法のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図60)。

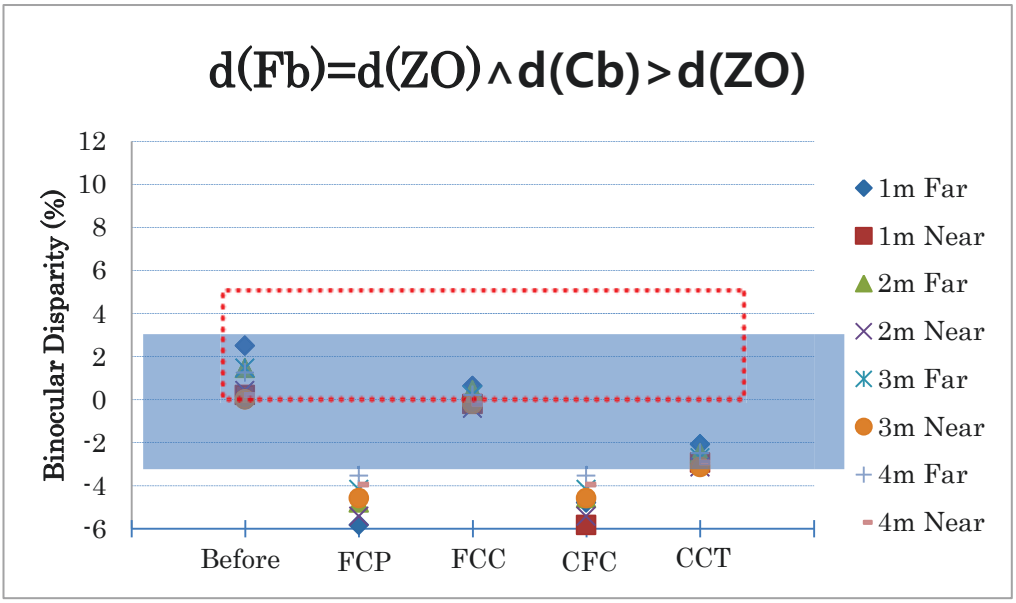


図 60　ケース 6 の両眼視差値結果

(7)　ケース7(d(Fb)>d(ZO)∧d(Cb)<d(ZO))

図61のケース7ではFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)の1、2m、CFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)の2、3mで視覚的不具合が発生し、FCP技法の3、4m、CFC技法の2、3mでは視覚的不具合と距離感の変動両方が発生した。FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）においては全ての距離で距離感の変動が発生。CCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった（表16)。

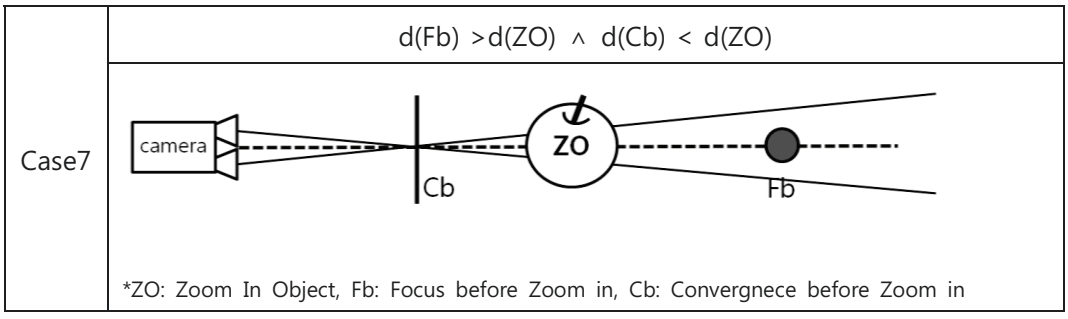
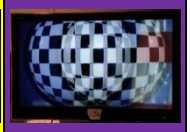
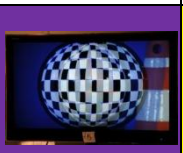
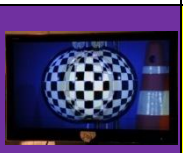


図 61　ケース 7 の側面図

表 16　ケース 7 の撮影結果の比較表

Case 7		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +1.88	Far: +6.25 Near: +5.63	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: +8.54 Near: -7.50	Far: +3.13 Near: +2.71
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.92 Near: +1.88	Far: +9.17 Near: +8.75	Far: +3.13 Near: -0.21	Far: +9.79 Near: -0.63	Far: +2.71 Near: +2.08
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near: +2.08	Far: +9.79 Near: -4.38	Far: +3.13 Near: -0.42	Far: +9.58 Near: -5.00	Far: +2.92 Near: +2.29
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +3.33 Near:+1.88	Far: +9.79 Near: -0.42	Far: +2.92 Near: -0.42	Far: +9.79 Near: -4.79	Far: +3.18 Near: +2.29

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース7では、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)で視覚的不具合が発生したことが分かる。FCP技法やCFC技法のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図62)。

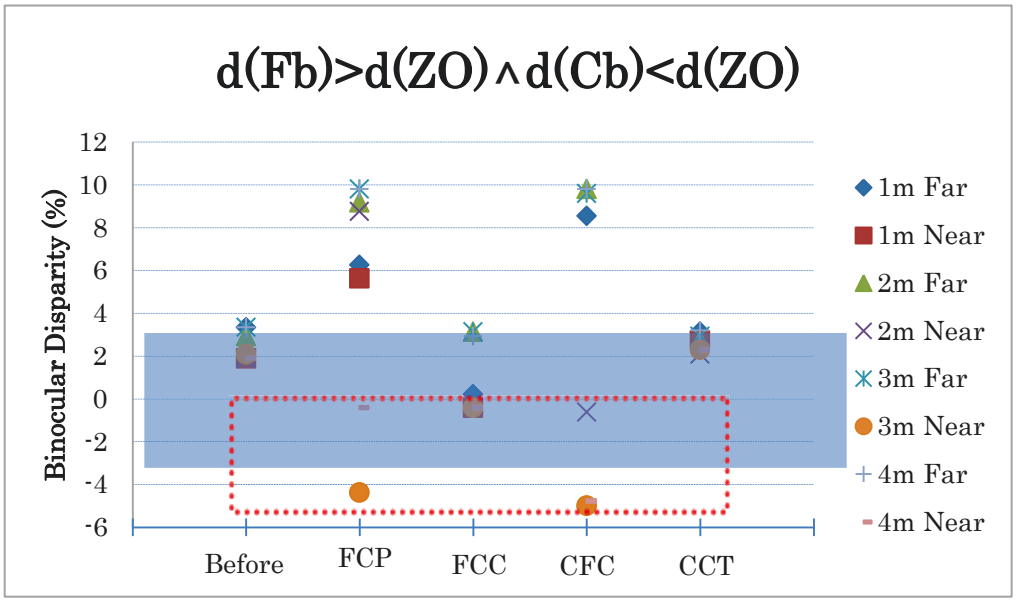


図 62　ケース 7 の両眼視差値結果

(8)　ケース8 (d (Fb) >d (Z0) ∧d (Z0) ≤d (Cb) ≤d (Fb))

図63のケース8ではFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)の1、2m、CFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)の1mで視覚的不具合が発生し、FCP技法の3、4m、CFC技法の2、3、4mでは視覚的不具合と距離感の変動両方が発生した。FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）においては全ての距離で距離感の変動が発生した。CCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった（表17)。

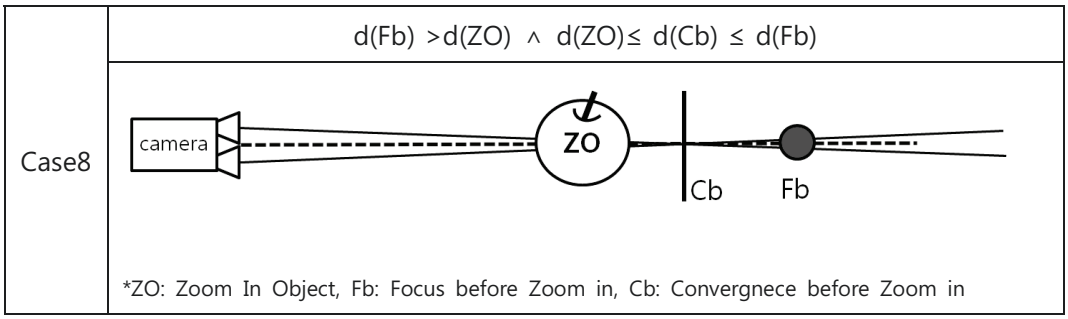
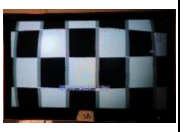


図 63　ケース 8 の側面図

表 17　ケース 8 の撮影結果

Case 8		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.29 Near: -0.21	Far: -5.00 Near: -5.63	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: +9.79 Near: +8.75	Far: -2.29 Near: -2.92
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +2.08 Near: -0.42	Far: -9.17 Near: -9.79	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: +9.79 Near: +8.75	Far: -2.29 Near: -2.92
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.88 Near: -0.63	Far: +9.79 Near: -9.58	Far: +0.42 Near: -0.21	Far: +9.79 Near: +8.75	Far: -2.50 Near: -3.33
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.46 Near: -0.83	Far: +9.79 Near: -9.59	Far: +0.42 Near: -0.21	Far: +9.79 Near: +8.75	Far: -2.71 Near: -3.33

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース8では、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において視覚的不具合が発生したことが分かる。FCP技法やCFC技法のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図64)。

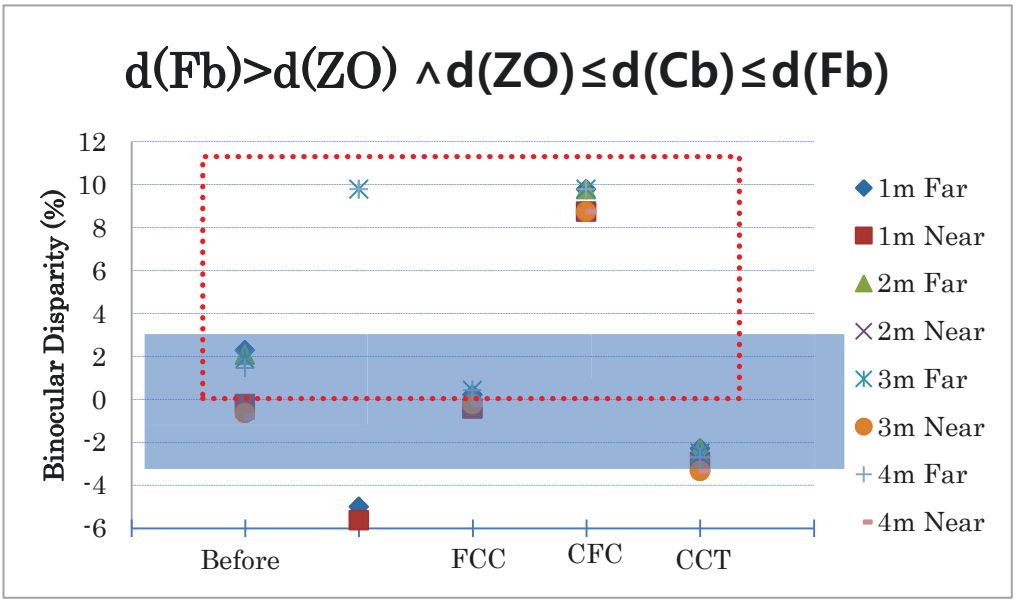


図 64　ケース 8 の両眼視差値結果

(9)　ケース9(d(Fb)>d(ZO) ∧d(Cb)>d(Fb))

図65のケース9ではFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)の1、2m、CFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)の全ての距離で視覚的不具合が発生し、FCP技法の3、4mでは視覚的不具合と距離感の変動両方が発生した。FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）においては全ての距離で距離感の変動が発生した。CCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)では何も問題が発生しなかった（表18)。

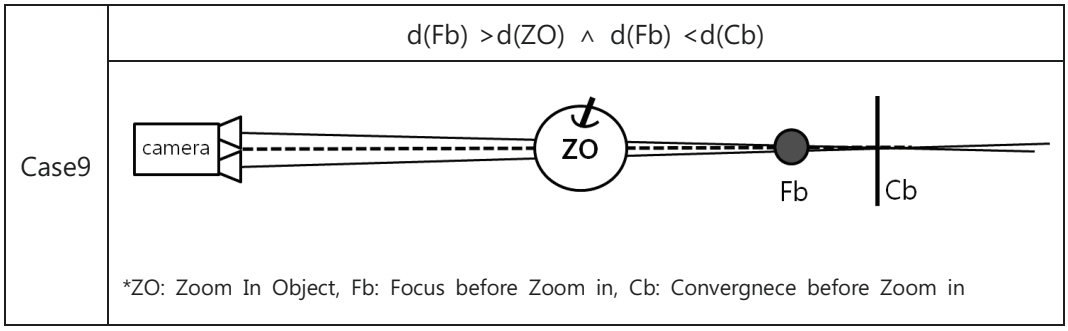
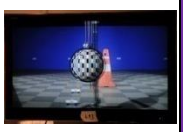
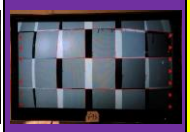
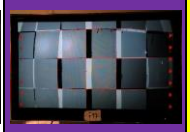


図 65　ケース 9 の側面図

表 18　ケース 9 の撮影結果

Case 9		Before	FCP技法	FCC技法	CFC技法	CCT技法
1 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.29 Near: -0.42	Far: -8.96 Near: -9.79	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: -5.00 Near: -5.83	Far: -2.29 Near: -3.13
2 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.67 Near: -0.83	Far: -4.79 Near: -8.54	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: -8.96 Near: -9.79	Far: -2.29 Near: -2.92
3 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.46 Near: -1.04	Far: +9.79 Near: -9.58	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: -3.13 Near: -9.38	Far: -2.08 Near:-2.71
4 m	実写の画面					
	Disparity	Far: +1.25 Near: -1.25	Far: +9.79 Near: -9.79	Far: +0.21 Near: -0.42	Far: -4.79 Near: -9.58	Far: -2.29 Near: -3.13

※赤色:視覚的不具合発生、黄色:距離感の変動発生、紫色:視覚的不具合と距離感の変動同時発生

ケース9では、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法(フォーカスコンバージェンスポイント連動技法)において視覚的不具合が発生したことが分かる。FCP技法のように反対側か、FCC技法（フォーカスコンバージェンスポイント一致技法）のようにスクリーン面に位置して距離感の変動が発生したことが分かる（図66)。

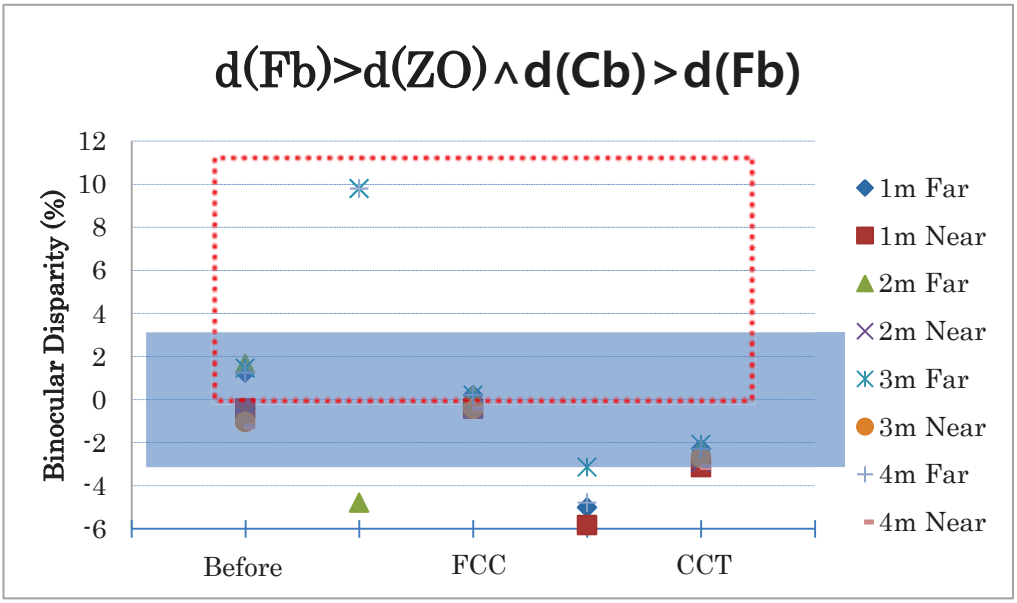


図 66　ケース 9 の両眼視差値結果

4　考察

FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とCFC技法においては、視覚的不具合と距離感の変動のどちらともが発生するが、視覚的不具合が発生する場合の方が多い。FCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技法)においては、元々スクリーン面より手前もしくは奥にあった被写体がスクリーン面にいってしまうため、距離感の変動が発生してしまう。しかし、全てのケースでCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)においては問題が何も発生しない。ケース5では、4つの技法全てにおいて±2%に位置し、全てがスクリーン面から動かないので、問題は何も発生しない。

9ケース全ての結果は表19の様になる。

表 19　ケース別に各技法で発生する問題

	FCP				FCC				CFC				CCT			
	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m	1m	2m	3m	4m
ケース1	■	■	■	■	□	□	□	□								
ケース2					□	□	□	□	□	□	□	□				
ケース3					◘	□	□	□	■	■	■	■				
ケース4	■	■	◘	■	□	□	□	□	■	■	◘	■				
ケース5																
ケース6	■	■	■	■	□	□	□	□	■	■	■	■				
ケース7	■	■	◘	◘	□	□	□	□	■	◘	◘	■				
ケース8	■	■	◘	◘	□	□	□	□	■	◘	◘	◘				
ケース9	■	■	◘	◘	□	□	□	□	■	■	■	■				

■：視覚不具合発生　　□：距離感の変動発生　　◘：両方発生

本実験では、一体型二眼式3Dカメラでのズーム使用時に発生する視覚的不具合と距離感の変動の問題を解決するため、ズームイン前のフォーカスと被写体及びコンバージェンスポイントの位置による関係モデルを提示し、コンバージェンスポイント位置によって発生しうる各々のケースを9種に分類し、定義した。そして分類したケースに対してコンバージェンスポイントを調整し、視覚的不具合と距離感の変動を最小限にする技法を導くための実験を行った。

表20は、フォーカスと連動したコンバージェンスポイントの動きに対するそれぞれの技法の実験結果を比較したものである。

表 20　ズームとコンバージェンスポイント連動技法の比較

調整方法	視覚的不具合	距離感の変動
固定コンバージェンスポイント技法	発生	発生
フォーカスコンバージェンス一致技法	発生しない	発生
フォーカスコンバージェンスポイント連動技法	発生	発生
快適視差範囲内のコンバージェンス移動技法	発生しない	発生しない

実験の結果、コンバージェンスポイントが動かない固定コンバージェンスポイ

ント技法(FCP技法)とフォーカスコンバージェンスポイント連動技法(CFC技法)は視覚的不具合と距離感の変動が発生した。フォーカスコンバージェンスポイント一致技法(FCC技法)では、視覚的不具合は発生しないが距離感の変動が発生した。快適視差範囲内のコンバージェンスポイント技法(CCT技法)では、視覚的不具合と距離感の変動が発生しないことが明らかになった。

第1章の3DCGによる立体映像を用いた実験では、カメラと被写体との距離設定を5mのみで行った点と36回の撮影実験データしかなかったため、フォーカスコンバージェンス連動技法では距離感の変動が発生せず、結果として不十分であったことが分かった。今回の実験のように、様々な状況を想定して実写映像を用いた144回の撮影データを分析した結果、フォーカスコンバージェンス連動技法も距離感の変動が発生したことが判明した。

5 まとめ

本章では、実写で撮影した映像での性能評価から、各技法別に視覚的不具合や距離感の変動の発生の有無を確認することを目標にした。そのため、ケース別に分けられた144個の映像を撮影し、その映像からSONY 3D BOX(MPE-200、MPES-3D01)を使用し、画面の中の近い所と遠い所の両眼視差データを集計した。集計したデータは表とグラフに整理した。グラフには、ケースごとの技法で快適視差範囲と距離感の変動発生領域を表示した。グラフに分類された値を使用して、各手法の視覚的な不快感や距離感の変動の発生率を分析した。4つの技法をケース別に使った分析結果を見ると、FCP技法ではケース2、3、5以外にはすべて視覚的不具合が発生した。CFC技法はケース1とケース5を除いた残りのケースで視覚的不便と空間歪曲が発生した。FCC技法は、視覚的不便はないが被写体がスクリーン面に移動して立体歪曲が発生した。CCT技法は、視覚的不便さと立体歪曲が発生しないことが分かった。また2章で提示したケースや距離、そして技法を適用したうえで1章の仮説を検証すると、これらの仮説が正しいことを確認することができた。この実写で撮影した映像を、次章では主観評価や心拍数の変化による客観評価を用いて検証を行う。

第 4 章　感情情報評価と実証実験の結果及び分析

前章では、実写で撮影した映像を快適範囲内の数値で評価して最も良い技法を選別した。そこで、数値で証明された視覚的不具合について、感性的に感じる刺激をどのような形で受け入れたのかを被験者を通してより細やかな検証を行う。

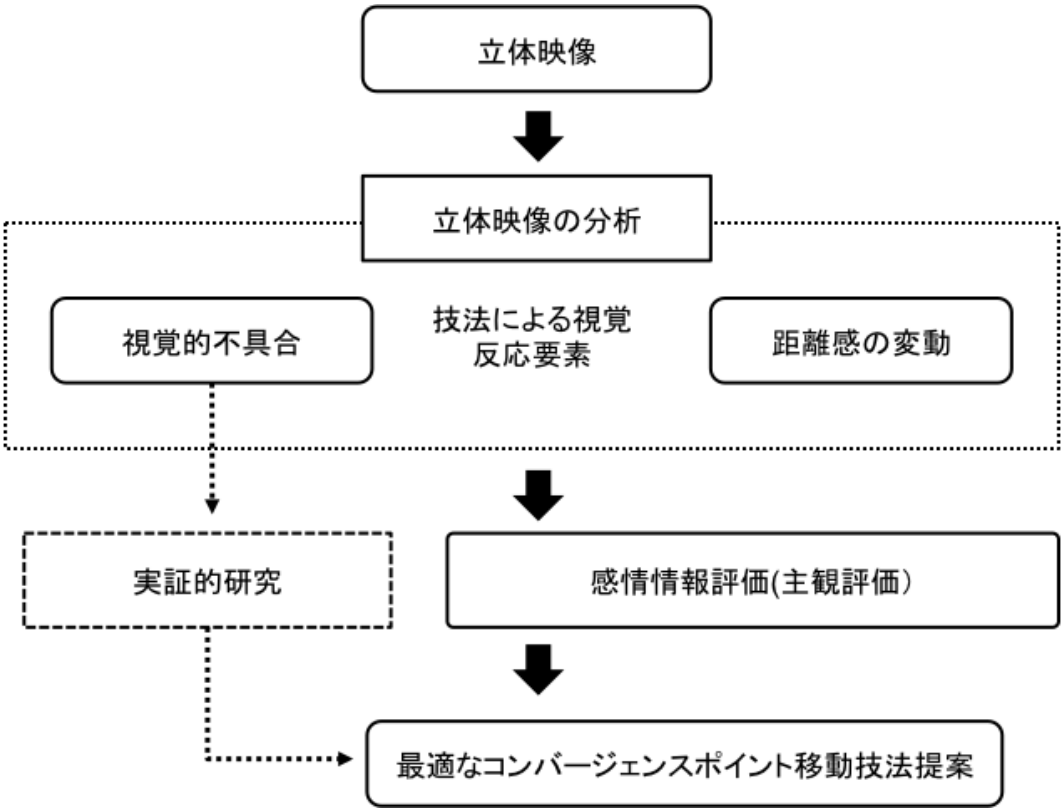


図 67　検証の流れ

本章では、図 67 のように前章で行った立体映像をコンバージェンスポイント移動技法による視覚反応要素の視覚的不具合、距離感の変動を取り上げる。そして感情情報評価である主観評価と心拍変動による客観評価を試み、最適なコンバージェンスポイント移動技法の検証を行う。

1　感情情報評価と実証実験

立体視による視覚的不具合又は不快感は、感性で受け止めることができる刺激の一つと言える。このような刺激の感性がどの程度数量化できるのかが重要である。直接的な方法は、刺激を与えた時に脳波、脳血流、脈拍、呼吸、血圧など生体情報を計測する方法である。これ以外に間接的な方法では、心理実験の一種である印象評価実験がある。つまり、アンケートなどを通じて被験者の記述や発言から被験者が受けた印象に関する情報を点数化して収集する方法である。この方法は、被験者の主観を基準にして印象を数値化するために主観評価と呼んでいる。この方法は基礎研究の分野をはじめ、様々な応用分野で一般的な方法で利用されている。

2　実証実験

2.1　心拍数について

両眼視差による視覚反応は人間の情報処理段階において優先的に現れるため、身体反応を迅速かつ正確に測定しなければならない。そこで本研究では身体反応の指標として、心拍数の測定を試みる。心拍数は酸素や栄養素を身体の各部位に運搬する血液供給のために心臓が1分間に拍動する回数のことで、身体反応の最も基本的な指標として知られている。普通の人の普段の平均心拍数は72回/分であるが、最大心拍数は180～200回と非常に大きいため、心拍数が心拍出量を調整する大きな因子となる[22]。

心拍数は心臓の電気的活動を測定することで、客観的な評価手段として用いられてきた[23]。本研究では実験者の生理的反応に対する測定の指標として心拍数を採択したが、これは生理学的測定方法のうちの一つであり、心臓の鼓動を測定することは、その人がどのようなものにどれくらいの注意を傾けているかを示す。

---

22 Whoijong Yoo「Influences of a Sound Design of Media Contents on Communication Effects -TV-CF Sound Using a BQ-TEST」Journal of broadcast engineering,Vol.13, No.5 pp.602-611, 2008.

23 Eston,R.G,A.V,Ingledew,E.K「Validity of heart rate, Pedometry, and accelerometry for prediciting of exercise intent and behavior in school children」 Journal of school health, Vol59(3), pp.112-115, 1998.

また、心拍数の生理的反応は、自律神経系を代表する心臓反応であり、心拍率は交感神経系と副交感神経系活動の相互作用の統制を受ける。このように、心拍数は一般的に身体活動を評価する客観的な手段として使われてきた[24]。心拍数による評価は、胸と手首と同様の身体部位にベルトや心電図検出器を装着し、受信機に送信して身体活動の生理的反応のデータを分析する。このような心拍数測定方法は主に二つあり、一つは胸の中央に装着する方法と、腕の脈拍を測定する間接測定方法がある[25]。本研究は映像に集中できるように胸中央に装着する方法を選択した。特に、本研究で採択した時計の形の心拍数、モニター、測定器(トランスメーター機)は装着が容易で長時間測定が可能だということに、生理的反応測定を比較的簡便かつ的確に特定することができるという長所がある。このような理由で、心拍数を立体映像鑑賞状況での視覚的不具合の測定の一つの指標として使用することにした。

2.2　実験の目的

前章で行われた実験結果、すなわちコンバージェンスポイント移動技法についての性能評価で出た結果を、機械を通じた数値ではなく人間の感性で評価をして視覚的不具合の程度を把握することである。

2.3　仮説の設定

本実験はコンバージェンスポイント移動技法の優位性を、生体反応で確認するために行うものである。立体映像による視覚的不具合が発生すると、映像を鑑賞している人は不快感を覚えることになる。したがって、映像を鑑賞する際の心拍について以下のような仮説が考えられる。

仮説「両眼視差が大きくなると、視覚的不具合による心拍数の拍動が早くなる」

安定した心拍から両眼視差が度を超えているズームインの映像を見ると不快感

---

24 William James「The Principles of psychology (ols 1 and 2)」New york: Dover Publication, 1950.
Walter B.Cannon,「Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage　-on account of recent reserchers into the function of emotion excitement(2nd ed.)-」New york: Appleton, 1929.

25 Whoijong Yoo「Influences of a Sound Design of Media Contents on Communication Effects -TV-CF Sound Using a BQ-TEST」Journal of broadcast engineering,Vol.13, No.5 pp.602-611, 2008.

を覚えるため、結果として心拍数が高くなると考えられる。そこで本章では、心拍数による生体反応をもとに、技法の優位性を検証する。

2.4　実験方法

本実験は計48人の被験者のサンプルを対象に、コンバージェンスポイント調整技法のズームイン映像によって身体的変化がどう出るのかを調べるために行った。実験方法はアンケートによる主観評価と心臓が拍動するときに発生する電気信号を測定する心電図(Electrocardogram:ECG)を適用した。

2.5　実験の流れ

(1)　実験環境

実験室は比較的騒音が少ない22～24°の温度を維持した密閉された空間であり、ディスプレイは1章の予備実験で使用した55インチ3DTV(LG TV 55LA6950)を使用する。偏光フィルター眼鏡を着用して実験を行う。標準視聴距離は画面の高さ(68.5cm)の3倍の離れた距離であるため、視聴距離は画面から205.5cm離れたところで視聴し、評価を行う（図68)。

実験対象者は時計型モニターとトランスメーター機を装着したまま実験室の中央に設置された椅子に座るようになる。心拍測定には、PolarRX800CXMultiを使用した。測定終了後に「Polar　Precision Performance」というソフトウェアを用いて、集計データの分析を行う。

図68　実験の様子

(2)　被験者

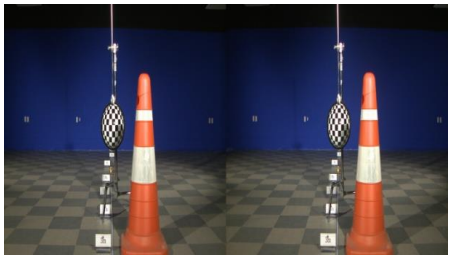
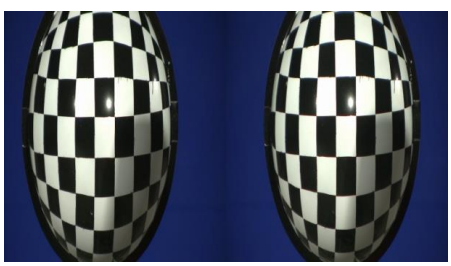
被験者は20~40代(平均23.2歳)の男女48人を対象に行った。男女の比は男子が64.6%で女子が35.4%である。ほとんどの人が3D映画を鑑賞した経験はあるが、3DTVの視聴はほとんど経験がなかった。

(3)　実験映像

実験映像は第3章で映像化したものを使用する。9種類のケースを四つの距離、そして四つの技法で映像化したものの中での理論と違い、実際には撮影が困難なフォーカス-コンバージェンスポイント連動技法を除いた108個の映像を使用し、視覚的不具合の反応を測定する。

各映像を見る前に18%の反射率を持つグレー画面を2分視聴して視覚についての安定感を確保してケース及び距離、技法による映像を100秒間繰り返して見せてアンケートを取り点数化して収集する。表21に実験映像の一例を示す。

表 21　検証用映像　(1−1−1 の例)

	実験用映像の内容	時間
18%反射率 グレー画面 (安定期)		2分
ケース、メーター 技法別ズームイン映像	 	100秒 (繰り返し)

(4)　アンケート内容

アンケート内容は、視覚的不具合と距離感の変動の発生する頻度を見るために集計を行う。立体映像がとても見やすい場合を最高得点の5点とし、そこから一つ下がってゆくたびに4点、3点と得点も下がってゆき、とても見にくいと評価された場合を最低得点の1点とする。

質問　1：見やすかった（立体視の快適さ）		**質問　2：被写体の位置関係（奥行き感）に変化があったか。**	
当てはまる	5	当てはまる	5
ややあてはまる	4	ややあてはまる	4
どちらでもない	3	どちらでもない	3
やや当てはまらない	2	やや当てはまらない	2
当てはまらない	1	当てはまらない	1

(5)　測定機器

本研究では、下記のPolar社の心拍数測定機器RS800CX MULTIを使用する。

図69　POLARモデル名:RS800CXMulti、受信機と送信機[26]

Polar社の測定機器は、心臓のECG信号を通じてリアルタイムの心拍数を簡単に正確に測定する機器である。胸に装着するベルト型トランスメーター(送信機)と腕時計型レシーバー(受信機)で構成されている（図69)。胸に装着するトランスメーターに内蔵されている+、ー電極が心臓の鼓動反応を感知し、これをレシーバーに無線伝送する原理で動作する。この原理を利用し、心拍数を正確に測定して目的に応じて個人の最大・最小の心拍数をチェックすることができる。

[26]PolarRX800CXMulti 取扱説明書

①　POLARの装着順序と測定方法

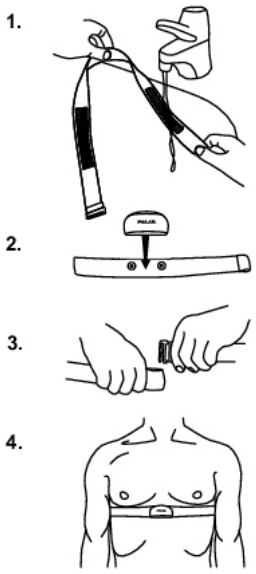


図70　トランスメーターの装着手順[27]

a.　図70のようにトランスメーターの端の部分やゴムバンドの先を連結した後、身体に合うように長さ調節して胸の真下に装着する。

b.　ランスメーター内側のセンサー部分に水分を付着させた後しっかりと肌に密着されているかを確認し、位置調整する。

c.　モニターのSTARTボタンを押すと、心拍数保存が開始される。数秒後の心拍数とフレームがあるハートシンボルが画面に表示される。

(6)　実験の進行過程

①　準備過程

実験は被験者に内容に対する事前告知をせずに実施した。まず、各被験者に実験24時間前から自律神経系に影響を及ぼすコーヒー、タバコ、薬物、アルコールの摂取を禁止することなどの注意事項を説明し、実験に臨むための基本姿勢を整えた。まず、被験者が到着すると約5分間安静にしてもらい、実験に対する説明を行った。その後、被験者の胸の中央部分に送信機(トランスメーター機)を装着し、事前に基準となる心拍数を測定した。実験前の事前測定は、2分間行った。

[27]PolarRX800CXMulti 取扱説明書

② 実験測定

基準となる心拍数の測定が終わったら各ケースとコンバージェンスポイント調整技法による動画を100秒の間、繰り返し見せる。実験完了後、図71の付属ソフトウェア、Polar Precision Performanceにデータを入力する。

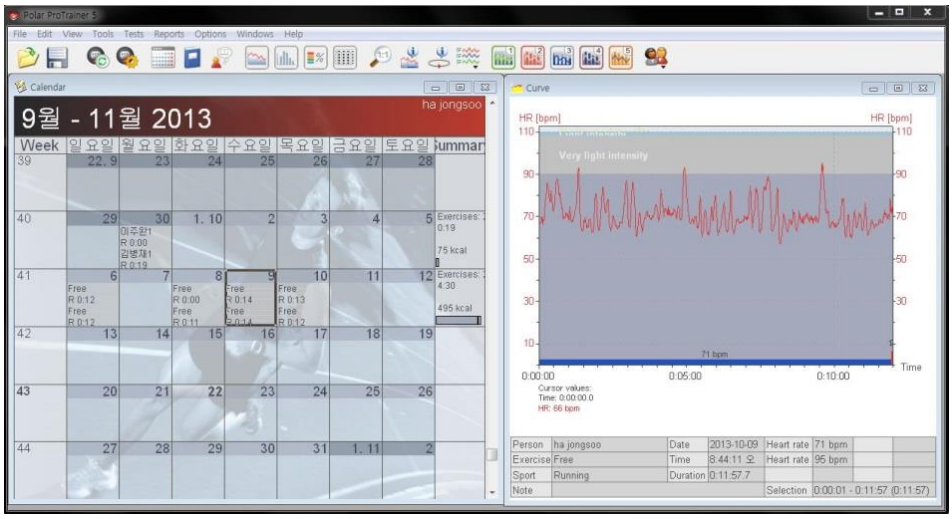


図71 Polar Precision Performanceプログラム

この生理的測定方法による指標は、コンバージェンスポイントの調整による両眼視差の変化、つまり視覚的不具合の反応を測定するものとしてその活用可能性が高いものと期待される。本研究では、心拍数を測定することにより、ズームインによるコンバージェンスポイント調整による視覚的不具合の反応の測定を試みた。

3 実験結果と考察

3.1 感情情報評価の結果及び分析

感情情報評価では、視覚的不具合と距離感の変動の刺激の反応がどの程度数量化できるかを、アンケートを通じて、被験者が受けた印象を点数化することで収集した。質問の答えの点数は最高得点の5点とし、そこから一つ下がってゆくたびに4点、3点と得点も下がってゆき、非常に見づらいと評価された場合を最低得点の1点とした。質問は、視覚的不具合や距離感の変動に関する質問で次のようなものである。

質問　1：　見やすかったか。(立体視の快適さ)

質問　2：　被写体の位置関係(奥行き感)に変化はあったか。

3.2　アンケートによる評価

アンケート統計の方法では、各距離によるグループ内でケース別に1要因繰り返し測定分散分析を実施した。主効果が現れた場合に限ってボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。

(1)　アンケート統計の評価

①　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(1m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表22　1m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析結果　(*P<0.05、**P<0.01)

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	28.648	.000	CCT	FCC	.063
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.063
				FCP	.004**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.004**
ケース2	13.259	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.003**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.003**
				FCP	1.000
ケース3	11.782	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.026*
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.026*
				FCP	1.000
ケース4	7.676	.003	CCT	FCC	.007*
				FCP	.002**
			FCC	CCT	.007
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.002*
				FCP	1.000
ケース7	9.7333	.001	CCT	FCC	.009
				FCP	.002*
			FCC	CCT	.009
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.002*
				FCP	1.000
ケース8	12.294	.000	CCT	FCC	.012
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.012
				FCP	.498
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.498
ケース9	16.410	.000	CCT	FCC	.074
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.074
				FCP	.079
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.079

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

ケース6は、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)の映像のエラーによって削除する。下位分析の結果、1m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)とFCP技法がFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した。CCT技法とFCP技法の間に有意な差が確認された(p<0.001)。ケース2においてはFCPとFCCでは有意ではない点数を示した（表22)。なお、測定分散分析の平均点は図72のとおりで

ある。

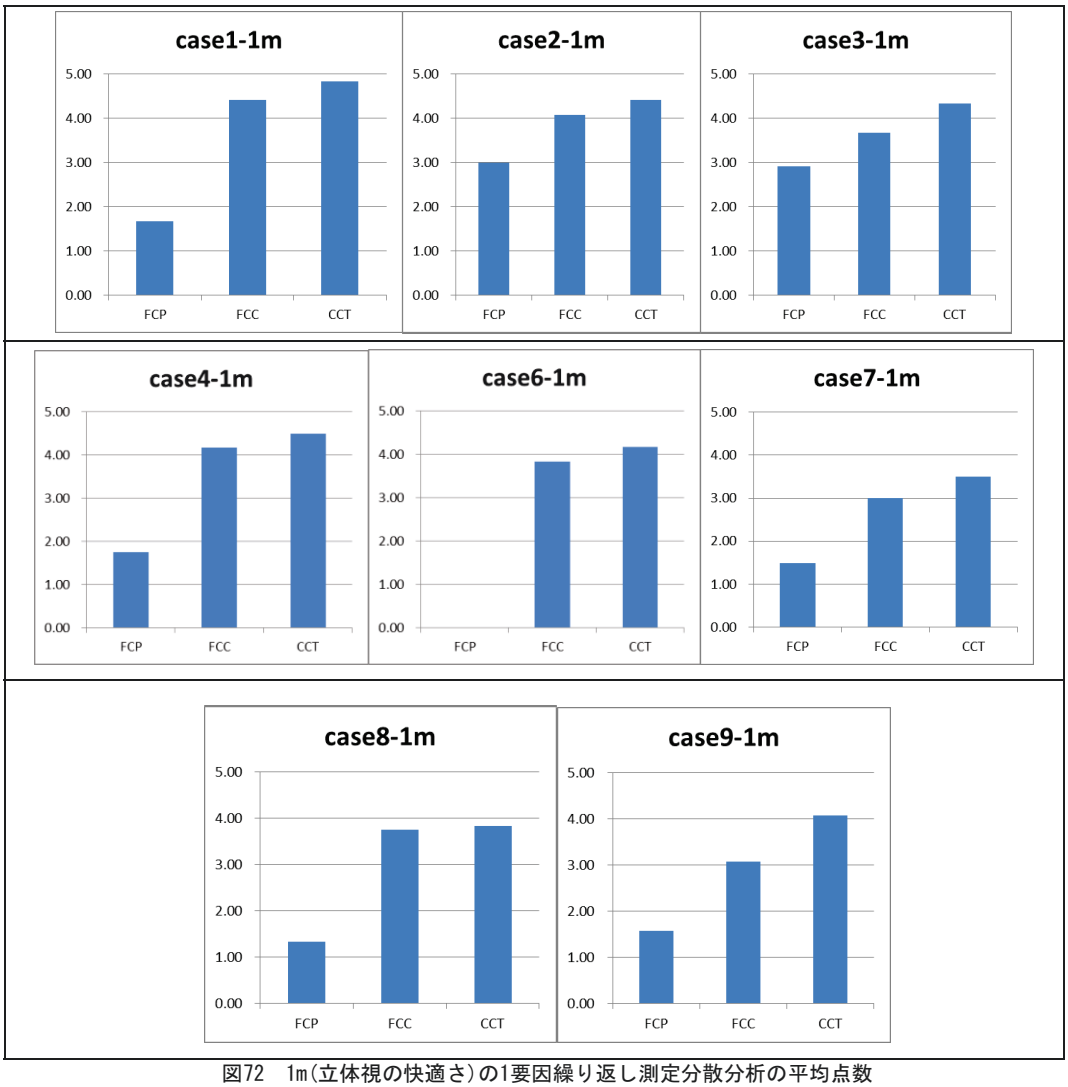


図72　1m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図72のように、1mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると9ケース全てでCCT技法が高い点数を得られたことが確認できる。

② 各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(2m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、ケース7以外は距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表23　2m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析結果　(*P<0.05、**P<0.01)

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	20.355	.000	CCT	FCC	.001**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.001**
				FCP	.068
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.068
ケース2	21.800	.000	CCT	FCC	.001**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.001**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.000**
				FCP	1.000
ケース3	22.664	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.000**
				FCP	1.000
ケース4	18.878	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	.068
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.068
ケース6	30.580	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	.573
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.573
ケース7	3.226	.059	CCT	FCC	.130
				FCP	.158
			FCC	CCT	.130
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.158
				FCP	1.000
ケース8	20.429	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.001**
				FCP	1.000
ケース9	12.320	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.009**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.009**
				FCP	1.000

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、ケース7以外に距離に関係なく、全てのケースで技法による効果が現れた。下位分析の結果、2m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した（表23)。なお、測定分散分析の平均点は図73のとおりである。

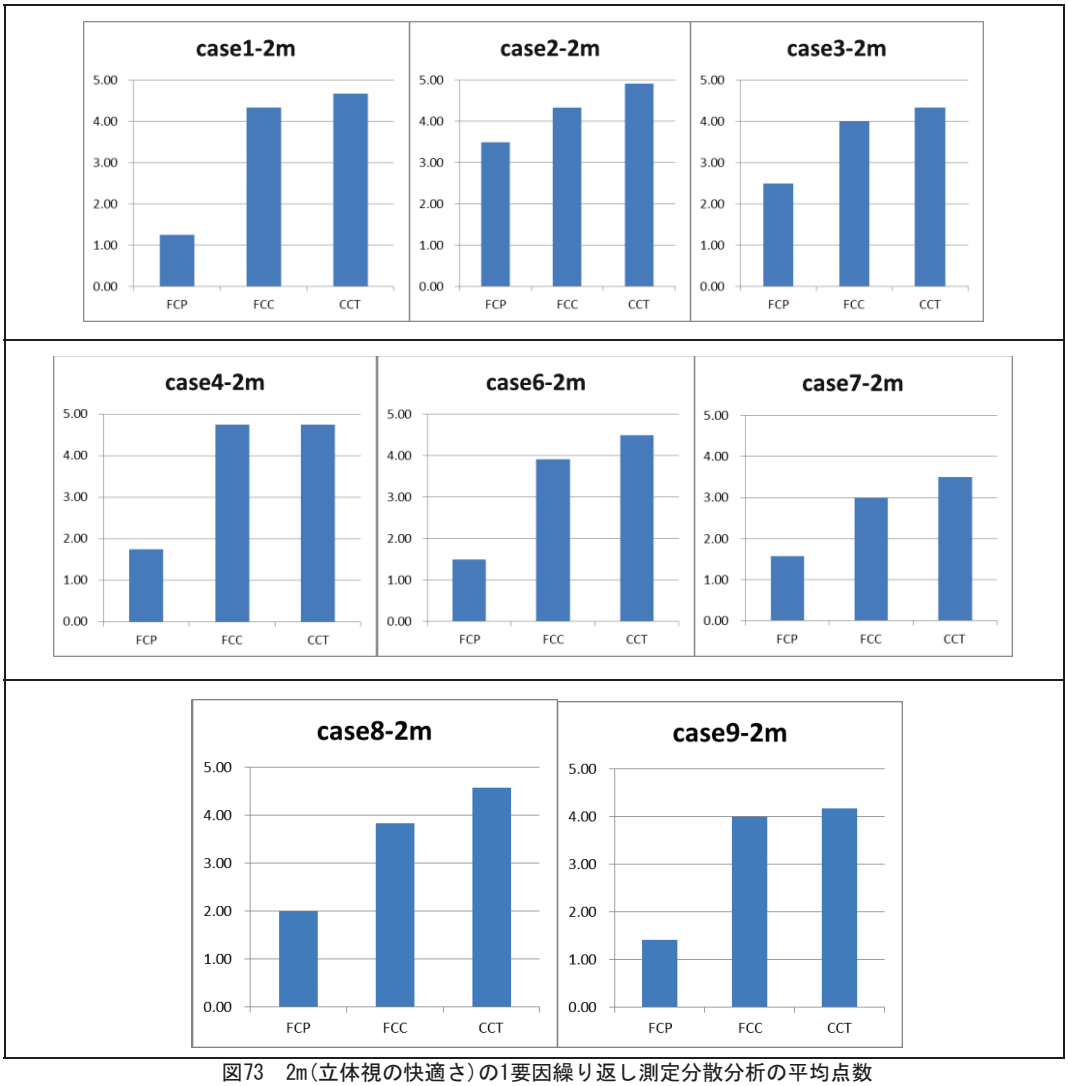


図73　2m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図73のように、2mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、ケース4ではFCC技法の点数が高いが、それ以外のケースではCCT技法が高い点数を得られたことが確認できる。

③　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(3m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表24　3m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析結果（*P<0.05、**P<0.01）

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	37.074	.000	CCT	FCC	.001**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.001**
				FCP	.038*
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.038*
ケース2	16.715	.000	CCT	FCC	.005**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.005**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.000**
				FCP	1.000
ケース3	16.481	.000	CCT	FCC	.002**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.002**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.000**
				FCP	1.000
ケース4	34.502	.000	CCT	FCC	.004**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.004**
				FCP	.013*
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.013*
ケース6	14.407	.000	CCT	FCC	.019*
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.019*
				FCP	.268
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.268
ケース7	13.797	.000	CCT	FCC	.006**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.006**
				FCP	.665
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.665
ケース8	24.063	.000	CCT	FCC	.001**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.001**
				FCP	.288
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.288
ケース9	26.220	.000	CCT	FCC	.001**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.001**
				FCP	.106
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.106

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、表24のように距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れた。なお、測定分散分析の平均点は図74のとおりである。

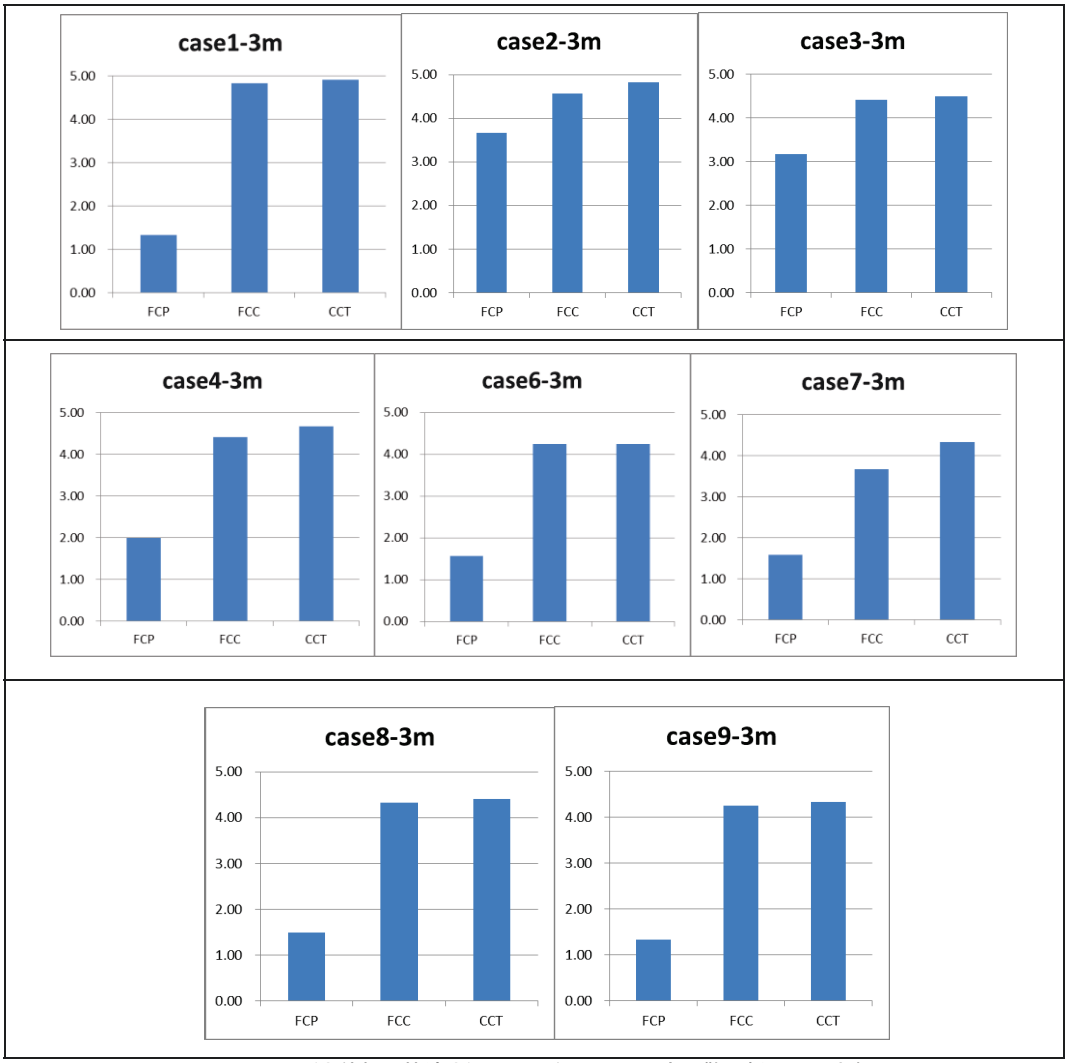


図74　3m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図74のように、3mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、FCC技法も高い点数を得られたが、９ケース全てでCCT技法が高い点数を得られたことが確認できる。

④　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(4m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表25　4m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析結果　　(*P<0.05、**P<0.01)

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	54.605	.000	CCT	FCC	.002**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.002**
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース2	13.259	.000	CCT	FCC	.006**
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.006**
				FCP	.418
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.418
ケース3	37.750	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	.075
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.075
ケース6	20.390	.000	CCT	FCC	.012*
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.012*
				FCP	.038*
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.038*
ケース7	23.294	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	.046*
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.046*
ケース8	17.370	.000	CCT	FCC	.000**
				FCP	.002**
			FCC	CCT	.000**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.002**
				FCP	1.000
ケース9	12.320	.000	CCT	FCC	.002**
				FCP	.003**
			FCC	CCT	.002**
				FCP	1.000
			FCP	CCT	.003**
				FCP	1.000

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

ケース4はFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)の映像のエラーのため削除する。下位分析の結果、4m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とFCC技法に比べて有意である高い点数を示した（表25)。なお、測定分散分析の平均点は図75のとおりである。

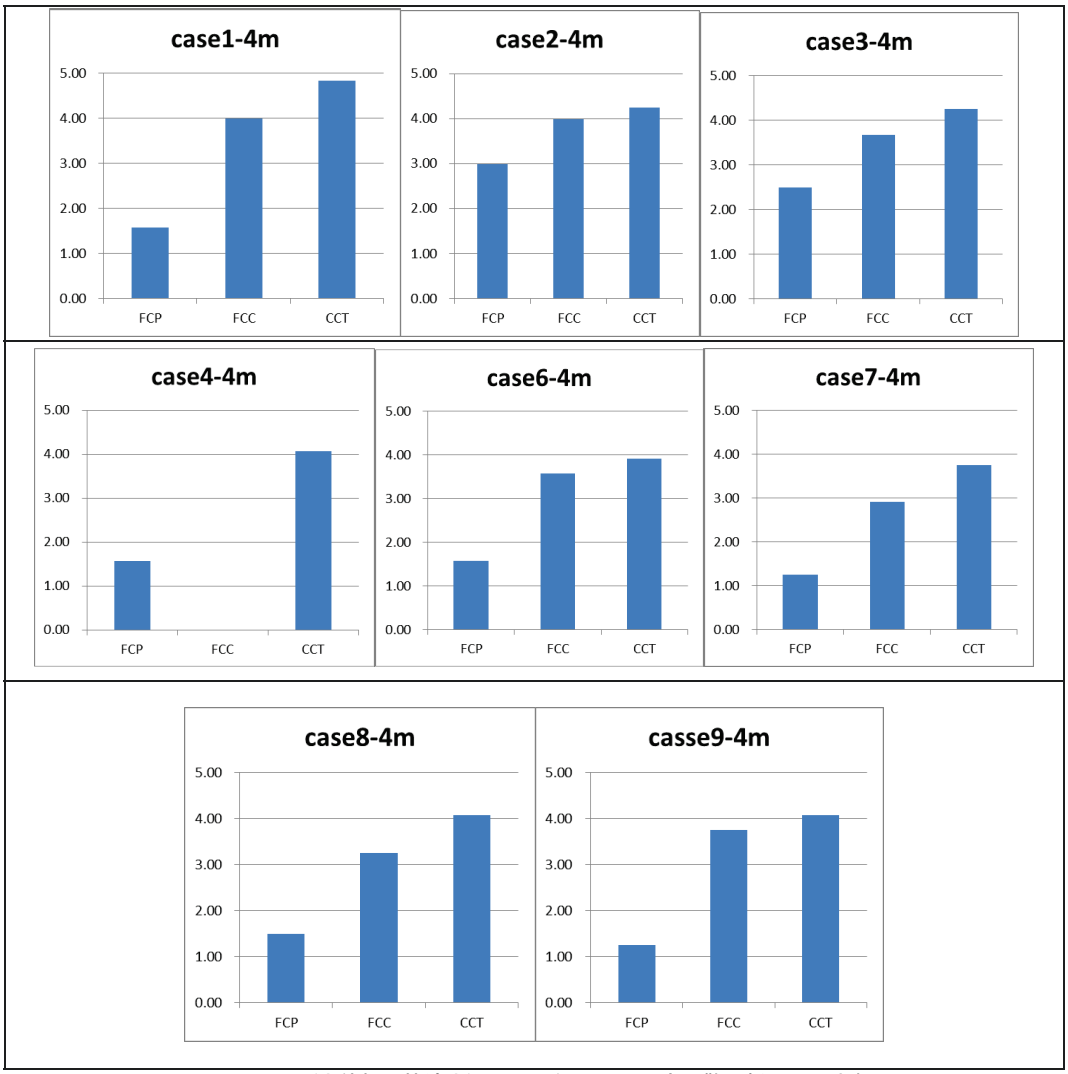


図75　4m(立体視の快適さ)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図75のように、4mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、9ケース全てでCCT技法が高い点数を得られたことが確認できる。

(2)　奥行き感に変化(距離感の変動)の結果

①　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(1m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、ケース6以外は距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表26　1m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析結果（*P<0.05、**P<0.01）

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	51.857	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース2	16.343	.000	CCT	FCC	.312
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.312
				FCP	.012*
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.012*
ケース3	12.730	.000	CCT	FCC	.035*
				FCP	.003**
			FCC	CCT	.035*
				FCP	.060
			FCP	CCT	.003**
				FCP	.060
ケース4	56.119	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース7	17.180	.000	CCT	FCC	.267
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.267
				FCP	.006**
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.006**
ケース8	52.298	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース9	48.231	.000	CCT	FCC	.006**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.006**
				FCP	.002**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.002**

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

ケース6はFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)の映像のエラーのため削除する。下位分析の結果、1m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法とFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した（表26)。なお、測定分散分析の平均点は図76のとおりである。

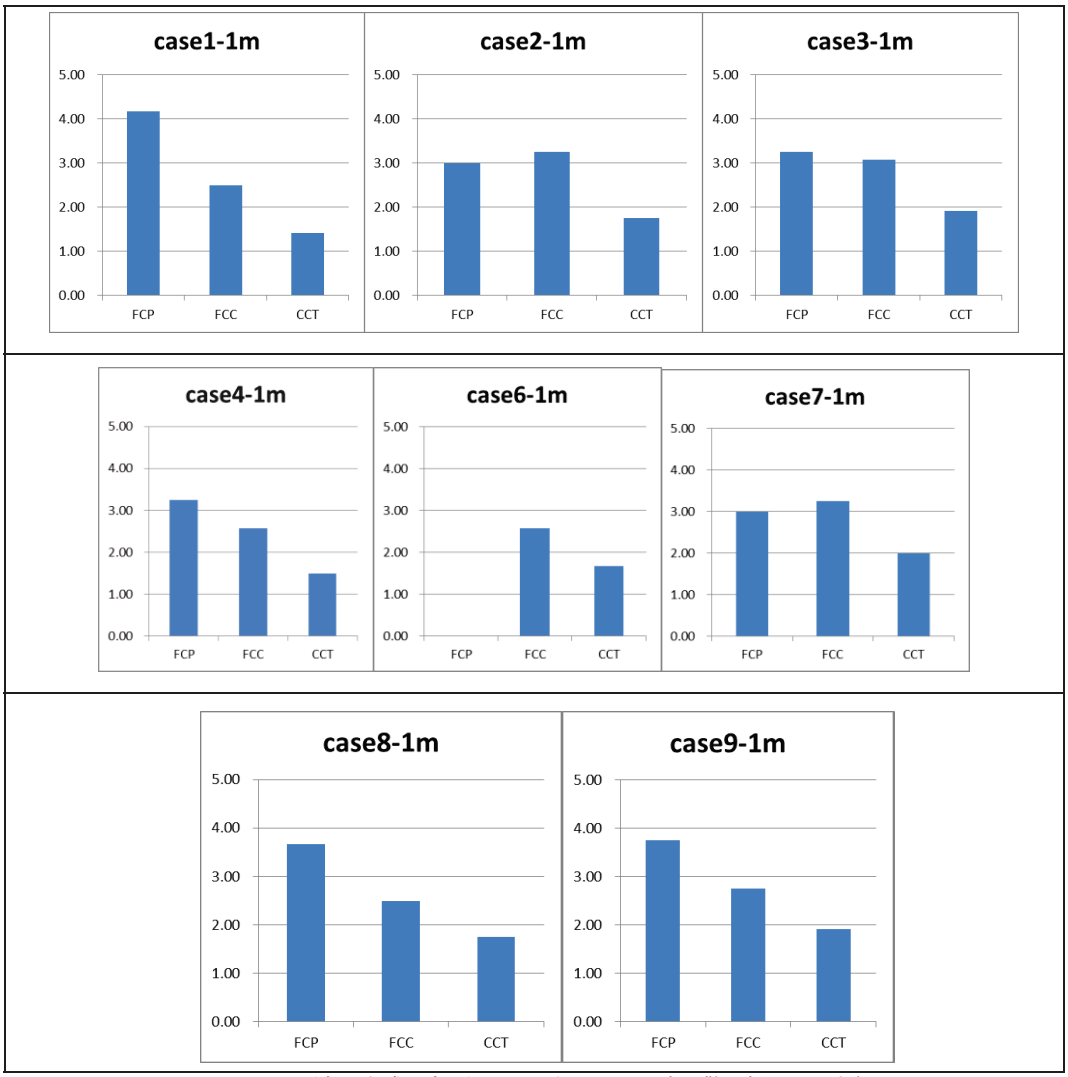


図76　1m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図76のように、1mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、9ケース全てでCCT技法が低い点数を得られたことが確認できる。

②　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(2m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表27　2m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析結果（*P<0.05、**P<0.01）

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	124.911	.000	CCT	FCC	.498
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.498
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース2	20.590	.000	CCT	FCC	.007**
				FCP	.001**
			FCC	CCT	.007**
				FCP	.016*
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.016*
ケース3	18.274	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.003**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.003**
ケース4	132.000	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース6	112.364	.000	CCT	FCC	.035*
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.035*
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース7	41.566	.000	CCT	FCC	.021*
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.021*
				FCP	.001**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.001**
ケース8	48.514	.000	CCT	FCC	.005**
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.005**
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース9	32.690	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れた。下位分析の結果、2m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した（表27)。なお、測定分散分析の平均点は図77のとおりである。

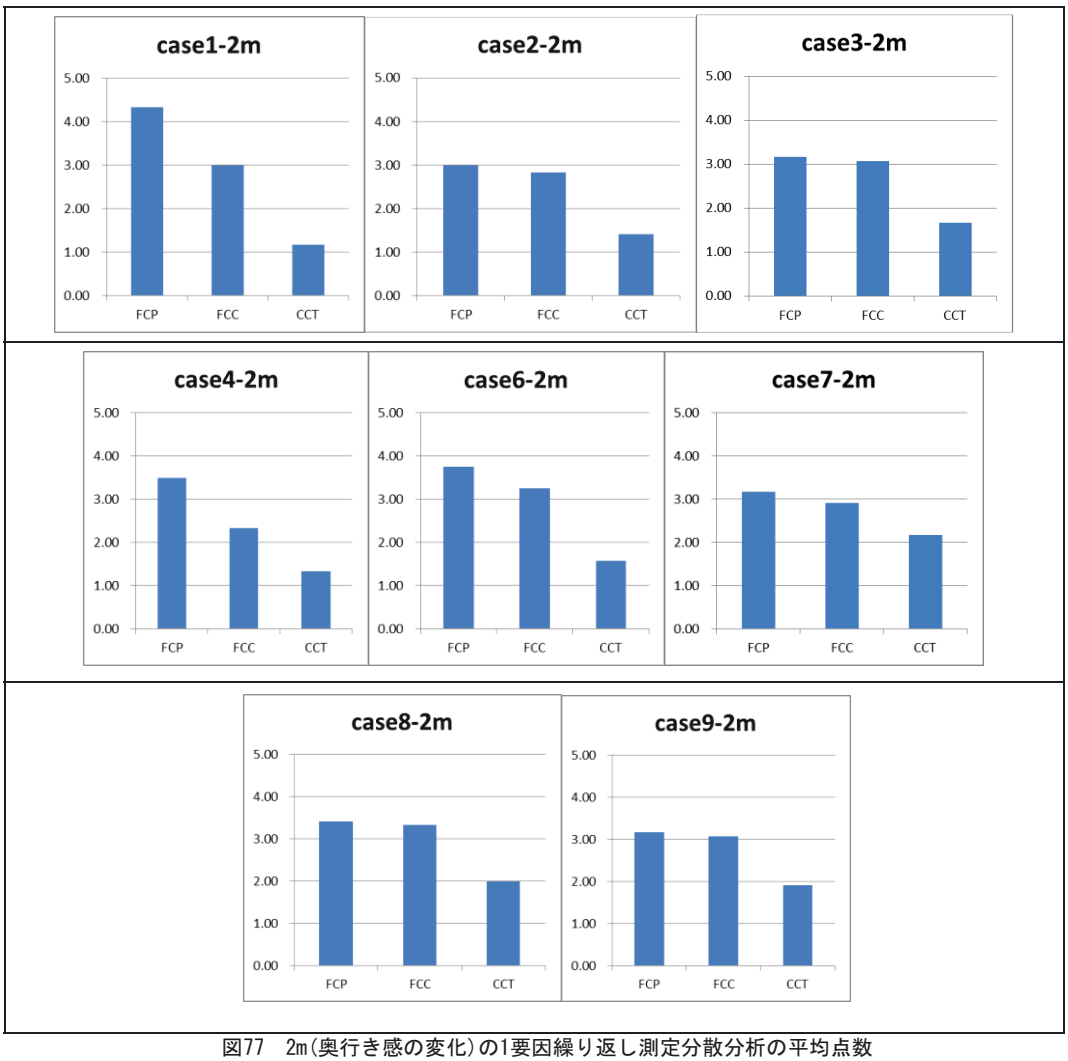


図77　2m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図77のように、2mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、9ケース全てでCCT技法が低い点数を得られたことが確認できる。

③　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(3m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表28　3m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析結果（*P<0.05、**P<0.01）

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	305.800	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース2	15.867	.000	CCT	FCC	.573
				FCP	.002**
			FCC	CCT	.573
				FCP	.006**
			FCP	CCT	.002**
				FCP	.006**
ケース3	24.415	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.001**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.001**
			FCP	CCT	.001**
				FCP	.001**
ケース4	43.126	.000	CCT	FCC	.246
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.246
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース6	64.000	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース7	48.172	.000	CCT	FCC	.014*
				FCP	.000**
			FCC	CCT	.014*
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース8	85.627	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**
ケース9	116.563	.000	CCT	FCC	1.000
				FCP	.000**
			FCC	CCT	1.000
				FCP	.000**
			FCP	CCT	.000**
				FCP	.000**

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、表28のとおり全てのケースで技法による主効果が現れた。下位分析の結果、3m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した。なお、測定分散分析の平均点は図78のとおりである。

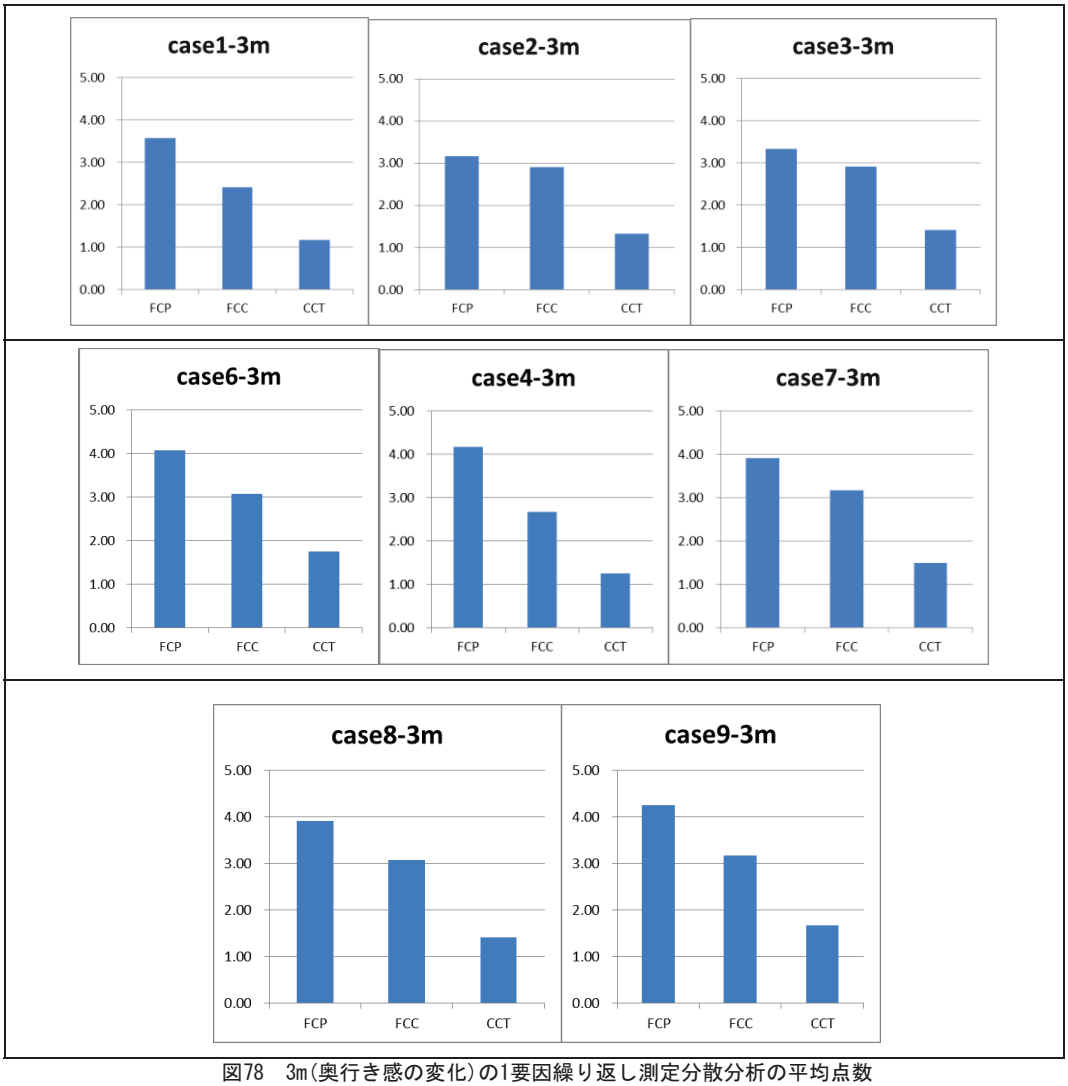


図78　3m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図78のように、3mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、9ケース全てでCCT技法が低い点数を得られたことが確認できる。

④　各条件における点数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)による相互作用(4m)

1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れたのでボンペローニ(Bonferroni)を利用した下位分析を実施した。下位分析では三つの技法を比較する。

表29　4m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析結果（*P<0.05、**P<0.01）

	F値	有意確率	ペアごとの比較		有意確率b
ケース１	161.966	.000	CCT	FCC	.002*
				FCP	.000*
			FCC	CCT	.002*
				FCP	.000*
			FCP	CCT	.000*
				FCP	.000*
ケース2	12.158	.000	CCT	FCC	.825
				FCP	.005*
			FCC	CCT	.825
				FCP	.012*
			FCP	CCT	.005*
				FCP	.012*
ケース3	18.053	.000	CCT	FCC	.139
				FCP	.002*
			FCC	CCT	.139
				FCP	.002*
			FCP	CCT	.002*
				FCP	.002*
ケース6	82.261	.000	CCT	FCC	.312
				FCP	.000*
			FCC	CCT	.312
				FCP	.000*
			FCP	CCT	.000*
				FCP	.000*
ケース7	50.658	.000	CCT	FCC	.016*
				FCP	.000*
			FCC	CCT	.016*
				FCP	.000*
			FCP	CCT	.000*
				FCP	.000*
ケース8	51.311	.000	CCT	FCC	.016*
				FCP	.000*
			FCC	CCT	.016*
				FCP	.000*
			FCP	CCT	.000*
				FCP	.000*
ケース9	98.241	.000	CCT	FCC	.660
				FCP	.000*
			FCC	CCT	.660
				FCP	.000*
			FCP	CCT	.000*
				FCP	.000*

推定周辺平均に基づいた

b. 多重比較の調整: Bonferroni

ケース4は、FCC技法の映像のエラーのため削除する。1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れた。下位分析の結果、4m条件のケース1においてCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)がFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)とFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)に比べて有意である高い点数を示した（表29)。なお、測定分散分析の平均点は図79のとおりである。

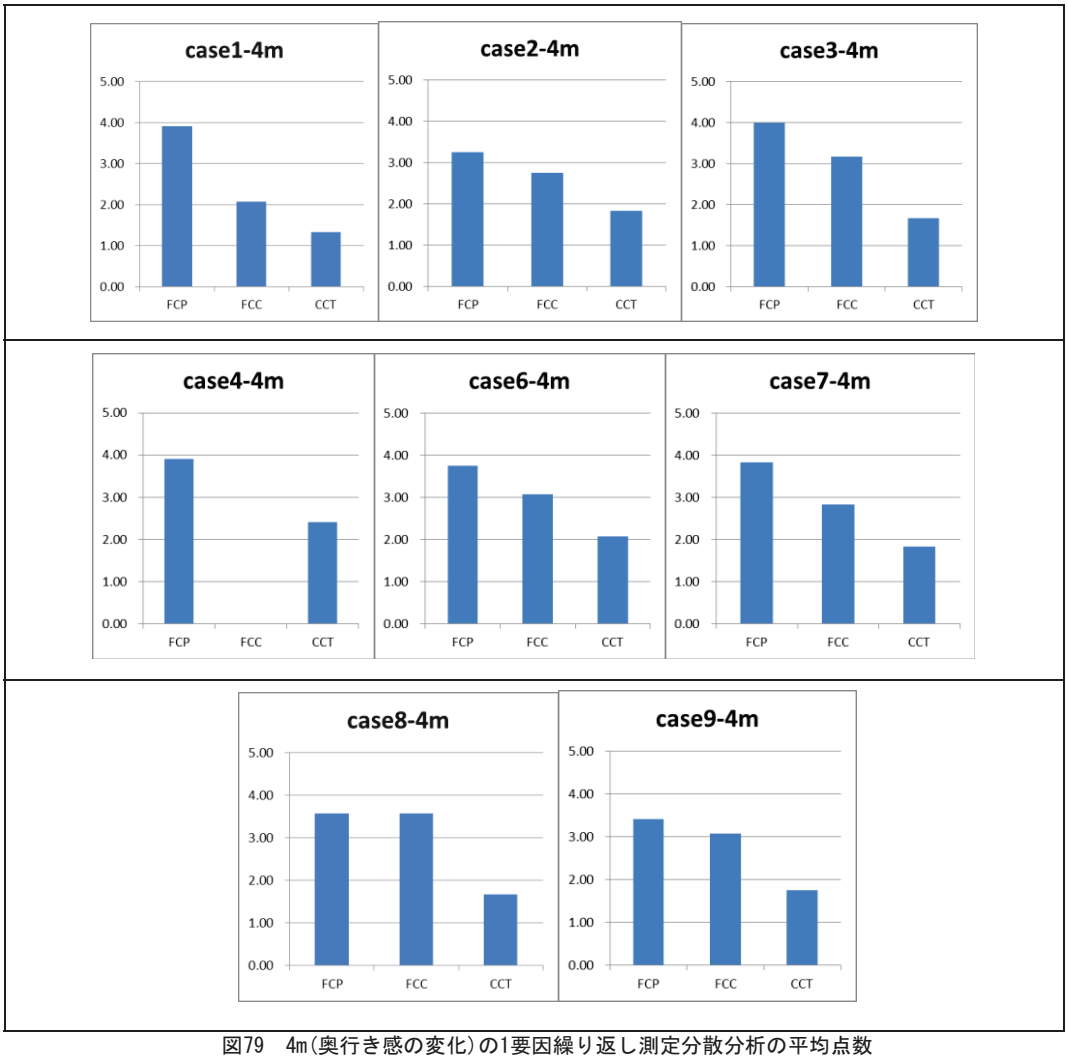


図79　4m(奥行き感の変化)の1要因繰り返し測定分散分析の平均点数

図79のように、4mの1要因繰り返し測定分散分析の平均点数のグラフを見ると、9ケース全てでCCT技法が低い点数を得られたことが確認できる。

3.3　実証実験の結果及び分析

(1)　1mの各条件における心拍数(mean±SD)と技法(FCC/FCP/FCP)と時間(安静、映像)による相互作用(表30)

表30　1mの2要因繰り返し測定分散分析結果　(*P<0.05)

	N	技法	安静平均	映像平均	F	P
ケース1	12	CCT	78.273	76.650	0.504	0.611
		FCC	78.095	77.565		
		FCP	78.630	78.405		
ケース2	12	CCT	81.536	80.577	1.109	0.349
		FCC	82.543	78.958		
		FCP	80.782	79.172		
ケース3	12	CCT	80.733	76.210	2.719	0.090
		FCC	77.465	76.014		
		FCP	80.520	79.550		
ケース4	12	CCT	78.768	80.799	2.952	0.075
		FCC	80.277	79.700		
		FCP	80.410	79.659		
ケース6	12	CCT	75.977	76.111	0.341	0.571
		FCC	77.931	76.616		
		FCP				
ケース7	12	CCT	73.001	73.409	0.965	0.396
		FCC	73.448	74.228		
		FCP	71.542	74.479		
ケース8	12	CCT	71.184	72.523	0.538	0.592
		FCC	72.545	71.869		
		FCP	73.023	72.883		
ケース9	12	CCT	72.048	71.016	0.734	0.492
		FCC	73.205	71.708		
		FCP	71.496	72.790		

表30のように、1mの各条件における心拍数とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)、FCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)の安静状態の時間、映像を見ている時間の相互作用は確認できなかった。

(2)　2mの各条件における心拍数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)と時間（安静、映像）による相互作用（表31）

表31　2mの2要因繰り返し測定分散分析結果　(*P<0. 05)

	N	技法	安静平均	映像平均	F	P
ケース１	12	CCT	80.166	77.942	1.394	0.269
		FCC	78.908	79.180		
		FCP	79.672	78.915		
ケース２	12	CCT	81.327	78.196	2.230	0.131
		FCC	78.278	80.099		
		FCP	77.886	76.912		
ケース３	12	CCT	75.715	74.554	1.180	0.325
		FCC	78.221	72.731		
		FCP	76.763	75.980		
ケース４	12	CCT	75.351	76.201	4.058	0.031*
		FCC	80.475	79.886		
		FCP	81.791	79.192		
ケース６	12	CCT	76.575	77.712	0.173	0.841
		FCC	77.073	77.063		
		FCP	75.368	75.288		
ケース７	12	CCT	76.328	75.036	0.243	0.786
		FCC	74.885	72.742		
		FCP	73.424	72.387		
ケース８	12	CCT	74.098	73.588	0.507	0.609
		FCC	75.613	72.898		
		FCP	73.416	72.670		
ケース９	12	CCT	72.464	74.680	0.507	0.609
		FCC	75.453	74.185		
		FCP	76.129	74.041		

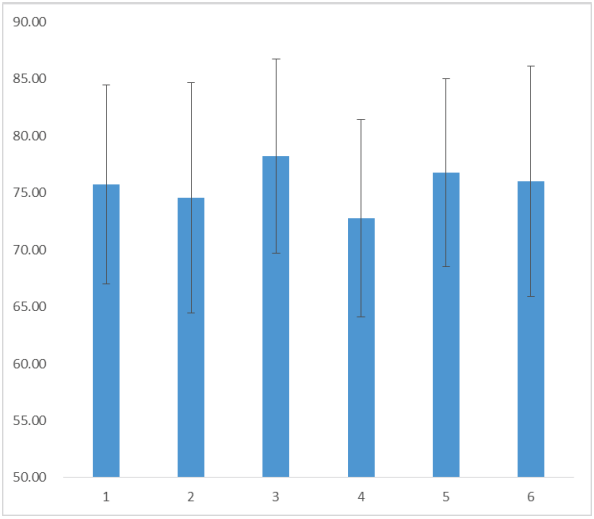


図80　2mのケース4のグラフ

表 31 と図 80 を見ると、2 要因反復測定分散分析を実施した結果、2m のケース 4 に主効果が現れた。それ以外の全てのケースでは、相互作用は確認できなかった。

(3) 3mの各条件における心拍数（mean±SD）と技法(FCC/FCP/FCP)と時間（安静、映像）による相互作用（表32）

表32　3mの2要因繰り返し測定分散分析結果　(*P<0.05)

	N	技法	安静平均	映像平均	F	P
ケース１	12	CCT	79.800	84.047	1.608	0.223
		FCC	84.369	79.698		
		FCP	83.634	83.853		
ケース２	12	CCT	84.589	81.266	2.545	0.101
		FCC	83.350	80.880		
		FCP	82.153	85.170		
ケース３	12	CCT	76.276	75.238	0.914	0.416
		FCC	76.181	73.992		
		FCP	75.351	76.201		
ケース４	12	CCT	82.163	81.309	0.597	0.560
		FCC	83.456	81.746		
		FCP	82.320	79.529		
ケース６	12	CCT	81.616	80.979	0.055	0.946
		FCC	79.995	80.115		
		FCP	81.813	81.542		
ケース７	12	CCT	79.401	79.735	0.177	0.839
		FCC	81.321	80.885		
		FCP	80.027	80.747		
ケース８	12	CCT	81.637	80.805	0.395	0.678
		FCC	81.141	79.272		
		FCP	78.344	78.909		
ケース９	12	CCT	79.246	79.165	0.528	0.597
		FCC	76.955	79.297		
		FCP	78.124	79.468		

表32のように、3mの各条件における心拍数とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)、FCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)の安静状態の時間、映像を見ている時間の相互作用は全てのケースで確認できなかった。

(4)　4mの各条件における心拍数(mean±SD)と技法(FCC/FCP/FCP)と時間(安静、映像)による相互作用(表33)

表33　4mの2要因繰り返し測定分散分析結果　　(*P<0.05)

	N	技法	安静平均	映像平均	F	P
ケース１	12	CCT	79.800	84.047	1.608	0.223
		FCC	84.369	79.698		
		FCP	83.634	83.853		
ケース２	12	CCT	84.589	81.266	2.545	0.101
		FCC	83.350	80.880		
		FCP	82.153	85.170		
ケース３	12	CCT	76.276	75.238	0.914	0.416
		FCC	76.181	73.992		
		FCP	75.351	76.201		
ケース４	12	CCT	82.163	81.309	0.597	0.560
		FCC	83.456	81.746		
		FCP	82.320	79.529		
ケース６	12	CCT	81.616	80.979	0.055	0.946
		FCC	79.995	80.115		
		FCP	81.813	81.542		
ケース７	12	CCT	79.401	79.735	0.177	0.839
		FCC	81.321	80.885		
		FCP	80.027	80.747		
ケース８	12	CCT	81.637	80.805	0.395	0.678
		FCC	81.141	79.272		
		FCP	78.344	78.909		
ケース９	12	CCT	79.246	79.165	0.528	0.597
		FCC	76.955	79.297		
		FCP	78.124	79.468		

表33のように、4mの各条件における心拍数とCCT技法(快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)、FCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)、FCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)の安静状態の時間、映像を見ている時間の相互作用は全てのケースで確認できなかった。

2要因反復測定分散分析を行った結果、2m条件のケース4において技法と時間の間に相互作用が見られた（p ＜ 0.05)。これに対する下位検定（ttest）の結果、他の技法に比べ技法ｃ条件において心拍数が安静時から有意（ｐ＜ 0.01）に低下していることが分かった。しかし、他の条件においては統計的に有意な差は見られなかった。このように有意な差は見られなかった理由として、大きく3つの原因が考えられる。一つ目は、焦点距離の変化で被写体が拡大されるズームインする映像の特徴によるものである。結果、被写体が大きく拡大される違和感によって両眼視差の差を感じられない可能性もあり、また、ズームインをしている間は被写体と背景が動いていることで両者の違いを区別しにくい可能性もある。二つ目

は、実験時間が長かったことである。1つの映像を見る度に休憩時間を設けたが、3時間以上の長時間の実験であったためしだいに集中力が下がってきたことが考えられる。長時間の実験がもたらす疲労によって、集中力の低下とズームインする映像に慣れてしまったのではないかと推測できる。最後に、今回の実験ではグループ別に有意水準を見たが、１グループあたりの人数は少ないのに対して実験の量がとても多かったことが考えられる。

4　まとめ

本章では、アンケートの主観評価と心拍数の変化をみる客観評価を行った。アンケートの主観評価では、立体快適範囲内のコンバージェンスポイント移動技法(CCT技法)が立体視の快適さにおいて、9種のケースの内で一番高い点数を得られたことが分かった。ケース2と3以外は固定コンバージェンスポイント移動技法と比べ差が激しいこともわかる。また、奥行き感の変化のアンケートの点数では一番低い点数で視覚的不具合や距離感の変動が発生しないことが分かった。

統計結果では、1要因繰り返し測定分散分析を実施した結果、距離に関係なく、全てのケースで技法による主効果が現れた。

下位分析の結果、1，2，3，4メートルそれぞれの条件の各ケースにおいて、CCT技法(立体快適範囲内のコンバージェンスポイント移動技法)はFCC技法(フォーカスコンバージェンスポイント一致技)とFCP技法(固定コンバージェンスポイント技法)に比べて高い点数を示した。したがってCCT技法は一番快適度合いの水準が高いことが分かる。また、技法による見やすさの点数に注目すると、CCT技法の場合平均4.3点、FCC技法は3.1点、そしてFCP技法は2.5点となり、これもまたCCT技法が一番高い点数を得た。

奥行き変化では、CCT技法は平均1.48点、FCC技法が2.51点、最後にFCP技法は3.43点の結果が出た。このことから、距離感の変動を最小化するには奥行き変化が起こらない方がいいということがいえる。

実証実験の結果は2要因反復測定分散分析を行った結果、2M条件のケース4において技法と時間の間に相互作用が見られた（$p < 0.05$)。これに対する下位検定（ttest）の結果、FCC技法とFCP技法に比べCCT技法の条件において心拍数が安静時から有意（$p < 0.01$）に低下していることが分かった。しかし、他の条件にお

いては統計的に有意な差は見られなかった。

このように主観評価では結果が得られるが、心拍の実験（客観評価）では統計的に有意な差は見られなかった。これは主観的な評価は可能だったが、生体的な反応が確認されなかったという意味になる。このように有意な差は見られなかった理由として大きく3つの原因が考えられる。

まず一つ目は、ズームインする映像の特徴によるものである。ズームインするということは焦点距離の変化で被写体が拡大されている。3Dではなく2D映像でも、被写体が拡大されると生体的な反応が見られる。結果、被写体が大きく拡大される違和感によって両眼視差の差を感じられない可能性もあり、また、ズームインをしている間は被写体と背景が動いていることで両者の違いを区別しにくい可能性もある。二つ目は、実験時間が長かったことである。1つの映像を見る度に休憩時間を設けたが、3時間以上の長時間の実験であったため、次第に集中力が下がってきたことが考えられる。特に、実験に使用したズームインしていく映像は100秒間で、その間被験者は集中しなければならない。長時間の実験がもたらす疲労によって集中度低下とズームイン映像に慣れてしまったのではないかと推測できる。最後に、今回の実験ではグループ別に有意水準を見たが、１グループあたりの人数は少ないのに対して実験の量が多かったことが考えられる。今回は実験映像の量が多かったため、48人の被験者を１グループ12人として、4つのグループに分類した。12人という人数に対して実験映像の量が多かったことで、有意な差が出なかった可能性が考えられる。

本実験を通して、有意水準でズームインする映像の技法を比較するための生態反応実験においては、短い時間に精密な分析が可能な脳波実験(EEG)などが効果的と考えられる。今後の研究課題としたい。

第 5 章　結論

一体型二眼式 3D カメラは、撮影前に光軸及び画角等を調節する必要がない。そしてフォーカス、しぼり、シャッタースピード、ホワイトバランスなどの正確なセットアップ機能と奥行き感を設定するコンバージェンスポイント調整機能がほとんどの製品に備えられており、一般ユーザーが利用しやすくなった。 しかし、立体映像技術が発達して実用化されている反面、人間に与える視覚的不具合や視覚疲労といった問題が浮上してきている。特に一般ユーザーは立体映像の特性を十分に理解できていないまま撮影を行う可能性があり、視覚疲労を誘発しやすい映像を制作してしまう危険性がある。このような状況を考慮して、誰もが簡単に撮影でき、快適に視聴することができる立体映像を制作するための技術開発の必要がある。

一般ユーザーが立体映像撮影を行う際に発生しうる最も大きな問題が、過度な両眼視差の発生である。両眼視差が大きいと、視野闘争が発生する可能性が高い。そこで一体型二眼式 3D カメラでは、両眼視差を調節するためにコンバージェンスポイントの調整機能がある。立体の奥行き感を調節し、視聴する人にとって安全な映像を撮影することが可能である。また、リグを使用した 2 台のカメラではズームすることが困難であったが、一体型二眼式 3D カメラでは二つのレンズが正確に連動して簡単にズームすることができる。

しかし、ズーム使用時にはコンバージェンスポイントの調整ができない。例えば、ズームインを行なうときは、コンバージェンスポイントになるスクリーン面が固定されたまま被写体が拡大されてしまう。このような場合、被写体とコンバージェンスポイントとの距離が遠いほど過度な両眼視差が発生するため、視覚的に不具合のある映像となってしまう。また、コンバージェンスポイントの動きが大きすぎると、奥行き感が急激に変化する距離感の変動が発生してしまうという問題が発生する。そこで、立体映像撮影においてズーム機能を用いた際に発生する視覚的不具合と距離感の変動を最小化するコンバージェンスポイントの調整技法を提案することを本研究の目的とした。

視覚的不具合や距離感の変動の発生という問題を解決するため、本研究では、まずズームイン時にコンバージェンスポイントを調整する基本的なアイデアを考

案した上で以下の二つの仮説を定義して、3DCG の環境に応じた予備実験を実施した。最初の仮説は、ズームインをした時に被写体にコンバージェンスポイントを移動すると、視覚的な不具合のない快適な映像を得ることができるということである。しかし予備実験では、視覚的な不具合をなくすためにコンバージェンスポイントを移動した時点で、ズームインの前後の奥行き感が維持されていない現象、すなわち距離感の変動が発生した。この問題を解決するために、第二の仮説であるズームイン前後の奥行き感を維持するためのコンバージェンスポイントを適当に調整することで違和感の発生をなくそうと試みた。20 人の被験者を対象に主観評価を行った結果、この二つの仮説が正しいこととして確認された。

この結果を踏まえ、ズームを使用した時のコンバージェンスポイントの位置が立体視の問題を引き起こす問題になっていると予想した。快適な立体視のためにはコンバージェンスポイントは、ズームと一緒に動く必要がある。そこで、ズームイン前のフォーカス、被写体とコンバージェンスポイントの位置状況を整理した。まず、ズームイン前のカメラからのフォーカスと被写体の距離に応じて 3 つの関係に分類し、さらに、それぞれのコンバージェンスポイントが位置する距離を 3 つずつに分類した。よって合計 9 種類の関係モデルを提示した。

次に、4 つのコンバージェンスポイント移動技法を提案した。一つ目は固定コンバージェンスポイント技法で、ズームイン前とズームイン後のコンバージェンスポイントが動かない技法である。二つ目は、フォーカスコンバージェンスポイント一致技法で、ズームイン前のコンバージェンスポイントがズームインと同時にフォーカスが合う被写体に移動する技法である。三つ目のフォーカスコンバージェンスポイント連動技法は、ズームイン前のコンバージェンスポイントが、ズームとフォーカスの被写体までの移動距離と同じ距離移動する技法である。最後の四つ目は、快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法である。ズームイン前のコンバージェンスポイントが、ズームと一緒に、フォーカスの移動距離と同程度フォーカス方向に移動するが、視覚的な不快感を覚えない快適視差の値の範囲内まで移動する技法である。

このように提示された 4 つのコンバージェンスポイント移動技法のそれぞれの優位性を比較するために、実写撮影を通じた性能評価を実施した。最初の実写評価では、提示したズームイン以前のフォーカス、被写体とコンバージェンスポイントの位置に応じた 9 つのモデルそれぞれに、1m、2m、3m、4mの 4 つの距離を設定し、4 つのコンバージェンスポイント移動技法を適用して撮影を行った。

撮影した映像を、SONY 3D-BOX という分析機器を用いて、ズームイン前後の両眼視差の変化を数値で分析した。ここでは実写で撮影した映像を数値で分析・評価することで、快適視差範囲の明確な区別ができ、その結果、快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法が最も良い手法であるということを確認することができた。また、各手法の視覚的不具合や距離感の変動の発生可否を確認することができた。最初に固定コンバージェンスポイント技法では、視覚的不具合や距離感の変動の両方が発生することが確認できた。、次に、フォーカスコンバージェンスポイント一致技法では、視覚的不具合は起こらなかったが、被写体がスクリーン面にすべて移動してしまい、距離感の変動が発生した。フォーカスコンバージェンスポイント連動手法は、視覚的不具合や距離感の変動の両方が発生することが確認された。最後の快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法では、視覚的不具合や距離感の変動の両方とも発生しなかった。

次に、性能評価の数値で証明された視覚的不具合や距離感の変動が実際にどのように感じるのか、48 人の被験者を対象にさらに詳細な検証を実施した。視覚的不具合に関する実験では、アンケートによる主観評価と心拍変動の客観的評価を試みた。距離感の変動については主観評価のみ実施した。視覚的不具合に関する実験の主観評価では、各手法間の比較分析（ボンペローニ分析）を行った結果、快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法（ CCT 手法）が立体視の快適感について 9 つのケース全てで最も高い評価を受けた。しかし、心拍の変化は、一つの実験以外に統計的に有意な差が見られなかった。

距離感の変動に関する主観評価では、快適視差範囲内のコンバージェンスポイント移動技法（ CCT 手法）が最も低い点数を受け、立体視におけるの奥行き感の歪みが発生しないということが明らかになった。

本研究の意義と独創性は、過度の両眼視差や輻輳による視覚疲労を感じることなく、コンバージェンスポイントを調節することで両眼視差と輻輳が快適範囲を超えていないまま立体映像を作ることができることを提案し、実証実験を通じて優位性を確認したことである。専門家でも困難な立体映像撮影を一般のユーザーでも簡単に、しかも安全な映像を撮影できるようにコンバージェンスポイント移動技法を提示することができた。

今後の研究として、3D 撮影におけるズーム表現としてさらに実用的に使用するために、本研究で使用したようなモザイクのボールではなく、人物などをモデルにしてより多様な表現手法を探っていく。加えて、ズームとドリーの効果を比較

しながら立体映像のさまざまなカメラワークを追求していくことも課題の一つでもある。また、本研究で取り上げた距離感の変動は、本来快適な立体映像の鑑賞の阻害要因の一つであるが、現象としては「被写体の位置や大きさが変化してしまう」というものである。したがって、ただ拡大するだけではない、立体映像における特異なズーム表現のひとつとして取り入れることも可能ではないかと考える。この点も、今後の課題として研究を続けていきたい。

今後の展望としては、この研究が、安全で快適な立体映像の撮影を簡単に行うことができるカメラの開発に活用されることが期待される。それが普及していくことで、一般家庭でも臨場感ある立体映像を、安全かつ快適に楽しむことができるようになることを期待する。

謝　辞

本研究を遂行するにあたって、多くの方々にお世話になりました。この場をお借りてして感謝の意を述べさせていただきたいと思います。

まず本論文の指導教員であり、主査の九州大学大学院芸術工学研究院准教授金大雄先生に深く感謝申し上げます。次に、在職中にお世話になった九州大学名誉教授、現長崎総合科学大学教授竹田仰先生、九州大学芸術工学研究院教授源田悦夫先生に深く感謝申し上げます。また本論文をまとめるにあたりまして、貴重なご教示をいただきました、九州大学大学院芸術工学研究院助教石井達郎先生、九州大学大学院芸術工学研究院准教授キムヨンキュ先生、九州大学大学院芸術工学研究院准教授上岡玲子先生、九州大学大学院芸術工学研究院教授伊藤裕之先生に深く感謝申し上げます。

多くの面で支えとなり、多大な協力をしていただいた九州大学芸術工学研究院金研究室（コンテンツデザインラボ）の方々に感謝申し上げます。

そして、私のことを気に掛けいつも優しく見守ってくれた能登谷みどり様に心より感謝申し上げます。

最後に、長期間の研究活動を支えてくれた、妻の美淑、長男の尹舒、長女の陵智に深く感謝します。

参考文献

1) 大口孝之、谷島正之、灰原光晴「3D 世紀　-驚異！立体映画の 100 年と映像新世紀」ボーンデジタル、2012

2) 河合隆史、盛川浩志、太田啓路、阿部信明『3D 立体映像の基礎―基本原理から制作技術まで―』オーム社、2010

3) 3D Consortium「3DC Safety Guidelines for Popularization of Human-friendly 3D」3D Consortium, 2010.

4) 『立体視テクノロジー―次世代立体表示技術の最前線―』エヌ・ティー・エス、2008

5) Marc Lambooji, Wijland IJsselsteijn, Marten Fortuin, and Ingrid Heynderickx,「Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: A review」Journal of Imaging Science and Technolgy, Vol. 53, No. 3, 2009.

6) Bernard Mendiburu「3D Movie making Stereoscopic Digital Cinema from Scriptto Screen」Focal Press, 2009.

7) 伊藤崇之「技研における立体テレビの研究成果」NHK 技研 R&D/No.123、2010

8) Miyasita T & Uchida T「Cause of Fatigue and its Improvement in Stereoscopic Displays」Proceedings of Society for Information Display, Vol.31, 1990.

9) Sumio Yano, Shinji Ide, Tetsuo Mitsuhashi & Hai Thwaites「A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images」Displays, Vol.23, 2002.

10) 小林秀明、浅井紀久夫「観察者が立体視で好む奥行き提示位置の検討」ITE Technical Report、Vol.34、No.12、2010

11) 半田知也「立体映像中止時の視覚反応―生体反応計測へのアプローチ―」ITE Technical Report、Vol.34、No.24、2010

12) 中村隆、野尻麿、阿部夏希、佐藤甲葵「立体映像による視覚疲労に関する評価」ITE Technical Report、Vol.27、No.21、2003

13) 矢野澄夫、江本正喜、三橋哲夫「両眼融合立体画像での二つの視覚疲労要因」映像情報メディア学会誌 Vol.57、No.9、2003

14) Brain Grdner 「Creative COW Magazine -Steroscopic 3D-」Creative COW, 2009.

15) AV watch、http://av.watch.impress.co.jp（2013.10.20 取得）

16) Whoijong Yoo「Influences of a Sound Design of Media Contents on Communication Effects -TV-CF Sound Using a BQ-TEST」Journal of broadcast engineering,Vol.13, No.5, 2008.

17) Eston,R.G,A.V,Ingledew,E.K「Validity of heart rate, Pedometry, and accelerometry for prediciting of exercise intent and behavior in school children」 Journal of

school health, Vol59(3), 1998.

18) William James「The Principles of psychology (ols 1 and 2)」New york: Dover Publication, 1950.

19) Walter B.Cannon,「Bodily changes in pain, hunger, fear, and rage -on account of recent reserchers into the function of emotion excitement(2nd ed.)-」New york: Appleton, 1929.

20) Siegmund Pastoor「3D-television:A survey of recent research results on subjective requirements」SignalProcessing:Image Communication, Vol.4, 1991.

21) Colin Ware, Cyril Gobrecht, Mark Paton, 「Algorithm for dynamic disparity adjustment」SPIE 2409, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems II, 150, 1995.

22) T. Motoki, H. Isono, and I. Yuyama "Present status of three dimensional television reserch", Proc. of the IEEE, 83. pp 1009-1021, 1995.

23) H. Ujike, "Estimation of Visually Induced Motion Sickness from Velocity Component of Moving Image", Virtual and Mixed Reality, LNCS, vol. 5622, pp.136-142, 2009.

24) S. Knorr, K. Ide, M. Kunter and T. Sikora, “The Avoidance of Visual Discomfort and Basic Rules for Producing Good 3D Pictures”, SMPTE, Vol 7, pp 72-79, 2012.

25) [6] Takashi Shibata, Joohwan Kim, David M. Hoffman and Martin S. Banks, “The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays”, Journal of Vision, Vol 11, pp 1-29, 2011.

26) Jongsoo Ha, Cheahoon Ban, Daewoong Kim, Tatsuro Ishii, “An Adjustment Method of a Convergence Point for Zoom-In on a Dual Lens Stereoscopic Camera”, Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer, Vol 235, pp 349-357, 2013.

27) 東京大学出版会編「基礎統計学Ⅰ　統計学入門」東京大学出版会 1991

28) 宮島英豪「よくわかる S3D 立体映像制作」WORKS Corporation、2011

29) H.C.Li, J.H.Seo, K.T.Kham, S.H.Lee,「Method of Measuring Subjective3 D Visual Fatigue:A Five-Factor Model」OSA/BIOMED/DH/LACSEA,2008.

30) Arditi.A.「 Binocular vision: Handbook of perception and humanperformance」New York: Wiley-Interscience, 1986.

31) Barry.S. R.「Fixing my gaze: A scientist’s journey into seeing in threedimensions」New York: Basic Books, 2009.

32) Biocca. F.「The cyborg's dilemma! progressive embodiment in virtualenvironment」JCMC, 3(2), 1997.

33) Howard. I. & Rogers. B.「Seeing in Depth, Vol. 2.Depth Perception」NewYork: Oxford, 2008.

34) Jones. G., Lee. D., Holliman. N., & Ezra. D.「Controlling perceived depthin stereoscopic images, in: Stereoscopic Displays and Virtual RealitySystems VIII」Proceedings of SPIE, 4297, 42~53, 2001.

35) Kim. T & Biocca. F.「Telepresence via Television: Two Dimensions ofTelepresence May Have Different connections to Memory andPersuasion」JCMC, 3(2), 9, 1997.

36) Qian. N. & Zhu. Y. 「Physiological computation of binocular disparity」Vision Research, 37, 1811.1827, 1997.

37) Reeves. B.「Being there: Television as symbolic versus naturalexperience」Unpublished manuscript, CA: Stanford University, Institutefor communication Research,1991.

38) Sadowsky. W. & Stanney. K.「Measuring and managing presence invirtual environments: Handbook of virtual environments technology」Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 2002.